

Title	自生的階層システムの発展に関する構成論的手法による研究
Author(s)	小林, 仁
Citation	
Issue Date	2001-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/719
Rights	
Description	Supervisor:橋本 敬, 知識科学研究科, 修士

修 士 論 文

自生的階層システムの発展に関する 構成論的手法による研究

指導教官 橋本 敬 助教授

北陸先端科学技術大学院大学
知識科学研究科 知識システム基礎学専攻

950032 小林 仁

審査委員： 橋本 敬 助教授 （主査）
中森 義輝 教授
梅本 勝博 助教授

2001 年 3 月

目次

1	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	本研究の意義	1
1.3	本研究の対象	3
1.4	先行研究	5
1.5	構築すべきモデル	6
2	モデル	8
2.1	テープとマシンの反応	9
2.2	テープ上の探索開始点	11
2.3	テープの翻訳	12
2.4	テープ, マシンの動力学	12
2.5	資源制約	13
2.6	モデルの種類	14
3	シミュレーション結果	15
3.1	モデル H_g, H_l の全般的な性質	16
3.1.1	空間構造の影響がない場合	16
3.1.2	空間構造の影響がある場合	29
3.2	モデル S_g, S_l の全般的な性質	29
3.2.1	空間構造の影響がない場合	29
3.2.2	空間構造の影響がある場合	30
3.3	並存するネットワーク間の関係	30
3.3.1	観察されたネットワークとその関係	31

4	議論	46
4.1	要素の作る構造	46
4.2	高次の構造	46
4.3	ネットワーク間相互作用と階層構造	47
4.4	高次の構造が出現する条件	49
4.5	一般の相互作用ネットワーク	49
5	結論	51

図 目 次

2.1	テープ, マシンの模式図	10
2.2	テープ, マシンの反応の模式図	11
2.3	マシンのヘッド, テール, 遷移表との対応, 及びテープ上の探索	11
2.4	マシンによるテープ書替え	12
2.5	テープの翻訳	13
2.6	局所的資源制約における, 反応確率, 及び半径 r_g 内の他のマシンの個数との関係	14
3.1	(T_1, M_{1002}) による自己複製の際の, 各テープの時系列グラフ	17
3.2	(T_1, M_{1002}) が T_5 に寄生されている際のネットワーク図	18
3.3	(T_1, M_{1002}) が T_5 に寄生されている際の, 各テープの時系列グラフ	18
3.4	$(T_{3f}, M_{df fb})$ による確率的自己複製の際の, 各テープの時系列グラフ	20
3.5	$(T_{3f}, M_{df fb})$ による確率的自己複製の際の, 主な反応のネットワーク	21
3.6	初期状態として 50 個ずつの $T_{3f}, M_{df fb}$ を配置したときのネットワークの発展 (ステップ = 1)	22
3.7	初期状態として 50 個ずつの $T_{3f}, M_{df fb}$ を配置したときのネットワークの発展 (ステップ = 5)	22
3.8	初期状態として 50 個ずつの $T_{3f}, M_{df fb}$ を配置したときのネットワークの発展 (ステップ = 10)	22
3.9	初期状態として 50 個ずつの $T_{3f}, M_{df fb}$ を配置したときのネットワークの発展 (ステップ = 20)	23
3.10	初期状態として 50 個ずつの $T_{3f}, M_{df fb}$ を配置したときのネットワークの発展 (ステップ = 30)	24
3.11	観察されたコアネットワークにおける各テープ時系列	26
3.12	図 ??における主な反応 (ステップ = 3500 ~ 3700)	27
3.13	図 ??の反応を構成する主要なネットワーク (ステップ = 3500 ~ 3700)	28

3.14	例 1 における各テープの時系列	32
3.15	例 1 における主なネットワーク (ステップ = 9000 ~ 9200)	33
3.16	例 2 における各テープの時系列 (ステップ = 3500 ~ 3700)	34
3.17	例 2 における主なネットワーク (ステップ = 9000 ~ 9200)	35
3.18	例 3 における各テープの時系列	36
3.19	例 3 における各位置での各テープのヒストグラム (ステップ = 3600)	37
3.20	例 4 における各テープの時系列	38
3.21	例 4 におけるネットワーク (ステップ = 3500 ~ 4000)	39
3.22	例 4 における各位置での各テープのヒストグラム (ステップ = 400)	39
3.23	例 5 における各テープの時系列	41
3.24	例 5 におけるネットワーク (ステップ = 3500 ~ 4000) ネットワーク B がな い場合	42
3.25	例 5 におけるネットワーク (ステップ = 3500 ~ 4000) ネットワーク B があ る場合	42
3.26	例 5 における各テープのヒストグラム (ステップ = 3990)	43
3.27	例 6 における各テープの時系列	44
3.28	例 6 における主なネットワーク (ステップ = 3500 ~ 4000)	45
3.29	例 6 における各テープのヒストグラム (ステップ = 3500)	45
4.1	例 1 において観察されたネットワーク間の関係	47
4.2	例 2,4 において観察されたネットワーク間の関係	48
4.3	例 1 において観察されたネットワーク間の関係	48
4.4	例 5 において観察されたネットワーク間の関係	48
4.5	例 6 において観察されたネットワーク間の関係	48

表 目 次

3.1 モデルの種類	15
----------------------	----

第 1 章

序論

1.1 はじめに

自然界や社会には、複雑な階層構造を持つものが多数存在する。企業や機械などは、ある目的に対してトップダウン的に作られることが多い。一方、生態系や市場における個体・組織間の関係、あるいはインターネット、生化学反応のネットワークなどは、自己組織的に生成される。後者は、下位のレベルでの要素が相互作用することで、構造的・機能的まとまりを作り、そのまとまり自体が相互作用することで、さらに上位のレベルを作っているとみなせるという意味において階層的かつ自生的である。ここではこのようなものを自生的階層システムと呼ぶ。

このように、自然界や社会の様々なレベルにおいて見られる、複雑な階層構造の自生的発展の条件および過程を、多様な触媒反応を担う化学物質同士の相互作用が反応のネットワークを形作る現象のモデルを一例に用いて考察する。

1.2 本研究の意義

一概に階層といっても、その対象とする概念にはある程度の広がりがある。一般に階層というとき、辞書的には、地位などで分けた人々の集団という意味と、より一般的には段階的に階をなすものという意味がある。ここで扱う自生的階層システムは、後者に属するようなもののうち、さらに物理化学的な物質の組成のような、集合論的な包含関係をもつものとする。

この自生的階層システムにおける階層の意味あい、また判別は、集合論的な包含関係という限定を加えても、自明なものとはならない。それは対象となるシステムを観測する手

段によって任意性を持つ。しかし、完全に任意なものであれば、重要なのは観測する手段であり、階層は研究対象として意味のないものである。しかしある対象を階層とみなすことが完全に任意かといえ、対象によっては階層の判別が容易なものと、そうでないものが存在するようでもある。そのような差異の原因は何であろうか。その原因について考察するため、階層に関連した研究を取り上げ考える。

サイモン [1] は複雑なシステムに対する考察のなかで、階層とは、

相互に関連するいくつかの下位システムから成り立っており、その下位システムがまた順次、もっとも低いレベルの基本的な下位システムに至るまで、同様の構造をもって連なっているシステムである

と定義している。ここでは、上位システムと下位システム、また同じレベルのシステム内の要素の関連の仕方については特に規定されていない。

サイモンは、ある動態的なシステムをこのような階層としてみなせる条件として、準分解可能性という概念を提案している。準分解可能性を持つシステムの条件とは、以下の二つである。

1. 構成要素である各下位システムの短期的な行動は、他の構成要素の短期的な行動からほぼ独立していること
2. 長期的には、いかなる構成要素の行動も、他の構成要素の行動にただ集合的に依存するに過ぎないこと

このようにサイモンは、システムそれ自体の性質によって階層とみなすことの妥当性が異なることを示唆した。よって、階層と捉えられるシステムは完全に任意ではなく、ある一定の性質を持っているといえる。

それでは、対象とするシステムをある方法で観測したとき、そこに階層構造の発展が見られる場合、それはシステムにおける性質のどのような変化を意味するのだろうか。階層とその発展に関連する2つの研究を挙げ、それについて考察する。

ポランニー [2] は、現在のレベルで定義されていない性質を定める境界条件をもたらすものとして、階層を定義した。例えば、言語においては、音が結びついて単語へと形成される仕方は、声の発生という最も低いレベルでは大方は定められていず、それは語彙により制御される。次に、単語がいかに結合されて文章になるかは、語彙のレベルでは大幅に不確定のままにされており、それは文法によって制御される。これより上のレベルについても事情は同じである。各レベルにおける現象は、それぞれ下のレベルからなるものであり、各レベルが異なる実在から構成されているわけではない。ここで、現在のレベルの上

に現在のレベルには見られない過程によって新たな階層が発生するということは、現在のレベルからは規定し得ない境界条件、ルールが現れるということに他ならない。ポランニーはこの過程を創発と定義した。

またバース [5] は、創発に対する定義、及びそのメカニズムを一般的に取り扱うため、新しい構造を生み出す手続きを形式的に記述した。彼は視点と、階層の観測に関する任意性の問題を統合するために、プリミティブな要素の区別、及びそれら要素の性質、その性質にしたがった相互作用全てに至るまで、観測という行為なくしては成り立たないという視点で形式を作った。その形式とは以下のようなものである。

まずある構造を S_i で表す。 $i \in J$ (添字集合) とし、構造 S_i の持つ特質を得るための観測メカニズムを $Obs(S_i)$ とする。この構造の集合に対して、観測のもとで見出された特質を、構造間の相互作用 Int として適用する。これにより新しい種類の構造、

$$S = R(S_i, Obs(S_i), Int), i \in J$$

が観測される。 R は観測により、高階の構造を発見するプロセスの結果を表している。この S を 2 階の構造といい、 S_i を 1 階の構造という。ここでさらに 1 階構造を $S_{i_1}^1, i_1 \in J_1$ 、2 階構造を $S^2 = R(S_{i_1}^1, Obs^1, Int^1)$ 、さらに族として、 $S_{i_2}^2, i_2 \in J_2$ と書くと、観測メカニズムを Obs^2 とする 2 階構造の観測を考えることができる。なお 1 階構造は 2 階構造とみなすこともでき、これにより、階の異なる相互作用により複雑な構造が生じることになる。従って、階層の発展はここでは n 階構造ができ、それらが相互作用することといえ、その結果として複雑な構造（ここではある集合間の種々の相互作用）がもたらされる。いいかえると、ある要素とみなせるものと、その間の相互作用が見出されるということである。

よって、階層の発展は、対象とするシステムにおける新たなルールの発生であり、そのルールによるプリミティブな要素の新たな区別の発生であるといえる。従って、階層の発展の条件、過程について研究することは、創発といわれる特性を持つシステムの理解にとって意義のあるものである。

1.3 本研究の対象

自生的階層システムと見られるものには、社会、言語、物質、生物など、様々なものがある。しかしこのなかには、階層システムを形作る上で、自生的なもののみが原因である場合と、例えば外部からの意思のような、階層システムをデザインする他の何らかの要因が存在する場合とが容易に切り離せないものもある。

本研究では、階層構造が自己組織的に発展するような要件を考察することを目的とするため、自生的なもののみが原因であるような階層システムの発展について調べる。すなわち、外部から階層システムをデザインする、意思のような、何らかの要因が存在しないと考えられる、生物進化、また生物の誕生に関係が深いと思われる化学進化を対象とする。

生物には、自生的に階層を発展させてきたと思われるものが多く存在する。また、生物においては、その過程での様々な利点から、階層的システムの起源が考えられてきた。

そのひとつは、シュスターによるものである。シュスターは、生物が進化において発展させてきたであろう、階層的システムの発展を示すモデルを提案している [3]。それは、次のようなものである。

1. まず、独立した複製因子が存在し、その間で競争と進化が起きる。
2. 競争の回避のため、複製の相互依存によるハイパーサイクル的關係 [7] を持った集団が成立する。
3. 細胞膜などによる空間的な統合により、外部のパラサイトから守られた、複製因子の集団が出来る。
4. 複製因子の集団が、新たな複製の単位となる。

つまりここでは、個体間の競争と、外部のパラサイトからの搾取の2つを回避した結果として、階層的システムが発展するということである。

また、サイモンは、複雑なシステムを形作る際、安定した中間体がある場合には、そうでない場合に比べて非常にはやくシステムが完成すること、またその際には形成されるシステムは階層的構造を持つことを、簡単な数学的議論から示した [1]。その要旨は以下のようである。

まず前提として、ある構造が形成される際、一定の割合でそれが中断する可能性があるとする。また、中断を受けた際、形成途上のものが再利用できなくなる、すなわち、再び最初から構造を形成しなければならないとする。構造を形成する速度が常に一定であるとすると、構造の形成に時間がかからない場合の方がより多くの構造を形成できる。もし、この構造を組み合わせるさらに別の構造を作ることができる場合には、複雑な構造を作るのに要する時間は格段に減少する。またこのとき、安定した中間体を組み合わせるという方法により、生まれてくる複雑な形態は階層的になる。

従って、潜在的に可能である複雑なシステムの中で、階層的なシステムだけが、現在までの時間で出現可能である。自然にみられる複雑なシステムにおいて、階層的構造が圧倒的に多く見られるのはこのためだと、サイモンは主張する。

しかし、これらはあくまで利点であり、自生的階層システムの起源に対する説明とはならない。また、進化的視点から見ても自生的階層システムの発展は、普遍的なことでも、必然的なものでもない。その理由は、生物の環境に対する適合度の増大は、目や足を得ることによっても失うことによっても達成される理由があるからである。また、階層の下レベルでの活動が、上のレベルでの統合を解体する恐れもある [4]。

それでは現在生物に見られるような多くの階層構造はどのように発展してきたのか。また、自生的階層システムが発展するための条件とは何であろうか。ここではその疑問を、生物における自生的階層システムの発展に深く関係するモデルを用いることにより考察したい。どのようなモデルを用いるべきかを考察するため、以下では、生物における自生的階層システムの発展という視点から、重要だと思われる研究について要約する。

1.4 先行研究

- マイヤー・ラスムッセン [6]

階層の発展そのものに焦点を当てた研究に、マイヤーとラスムッセンのものがある。この研究は直接生物とは関係しないが、生物の起源に必要不可欠であると思われる、細胞膜の前段階的なものの生成をシミュレーションによって示すものである。またこれは、化学物質間の物理化学的作用により、バースのというような新しい構造が作り出される現象をシミュレーションにより示したものである。この研究は、まず始めに基本的要素であるモノマーと、種々の物理化学的相互作用が定められている。モノマーはお互いと相互作用することで次第にポリマーを作り出し、ポリマーはさらにミセルを作り出すというものである。またここでは、実際に階層的システム生成の一例が示されている。しかし、ここで用いられたモデルはリアリスティックである反面、非常に複雑であり、モデルのどのような性質が現象と結びついているかが極めてわかりにくい。

- アイゲン・シュスター [7]

多様な触媒作用を持つ化学反応ネットワークの研究として、アイゲン・シュスターの提唱するハイパーサイクルがある。これは分子進化に関するモデルである。複製単位が高分子からなる場合、その大きさが大きくなるにつれて、複製の際にエラーが起る確率が高くなる問題がある。しかし小さ過ぎる分子では、十分な機能をもった触媒をつくることができないであろう (Eigen's Paradox)。そこで、その解決として、複数の分子が互いに複製を触媒し合う、ハイパーサイクル構造が考えられた。この構造は新しい階層の要素とみなすことはできる。しかしこの構造の自己組織化のプ

ロセスについては明らかでない。また、互いに複製を触媒し合う分子のループを構成する要素が一定数を越えると、サイクルは不安定になる。また、サイクルはノイズに弱く、その影響によってループはより短くなりやすい傾向をもっている。そのため、ある程度小さな構造しか存在することはできない。さらに、寄生的な分子の出現によって、少ない情報しか持たないものに退化してしまう可能性が高い。よって、新しい階層の出現とみなすことのできる、複数のハイパーサイクルの相互作用が起きるのはきわめて難しい。

- 池上，橋本 [8, 9]

ハイパーサイクルのような反応のネットワークが生成し、さらに複雑なものとなるものとして、池上，橋本によるテープとマシンの共進化のモデルがある。このモデルは、化学種のポピュレーションダイナミクスを用いたものである。このモデルにおいては、ハイパーサイクルよりもかなり大きな規模の、非可逆的で安定したコアネットワークと呼ばれるものが生まれる場合がある。しかしこのネットワークも、複数個が存在し相互作用をするということはない。ネットワークが複数存在して、かつ並存し得るようなものとして細胞膜でテープとマシンを区切り、その細胞内で発展したネットワークが他の細胞と相互作用するような研究が行われている。しかし、この細胞膜はあらかじめ与えられるもので、自己組織的なものではない。

- フォンタナ [10]

上記の、テープとマシンのモデルと同様な意義を持つものとして、フォンタナの入式による化学反応システムの研究がある。ここでは、別々に発生した自己維持的ネットワークを一緒にすると、2つのネットワークが相互作用しながら安定した状態を保つ場合があるが、上の階層をあらかじめ規定しており、階層的システムの発生については説明していない。

1.5 構築すべきモデル

先行研究より、自生的階層システムの発展の条件、過程を調べるためには、基本となる要素の上位のレベルをあらかじめ規定せずに、様々な局所的な構造が相互作用するシステムが生まれるようなモデルを構成する必要があると考えられる。

ここでは、局所的な構造として化学反応のなすネットワークを選択した場合、自生的階層システムの発展の条件、過程を調べるためのモデルとしての先行研究の問題点をまとめる。

まず、アイゲン、シュスターのハイパーサイクル [7] は、化学反応がネットワークをなすことの意義を与えた。しかし問題点として、それがどのようにしてできるかについては説明せず、また大きく複雑な反応ネットワークを許すものでもないという点が挙げられる。

それに対して、池上、橋本によるテープとマシンのモデル [8, 9] は、ネットワークの自己組織化と、その規模、複雑さという点において解決を与えた。しかし問題点として、生成されたネットワーク同士の相互作用については、細胞膜という特異な構造をあらかじめ設定しなければならないことが挙げられる。この原因は、テープとマシンの反応が、均一に攪拌された化学物質のように、各種が（各個体でなく）、その全体に対する濃度によって、ある確率で、均一に反応するという、ポピュレーションダイナミクス的方法をとったために起こると思われる。つまり、反応の個別性、多様性を保つためには反応自体のある構造で区切らねばならないということである。

また、フォンタナの入式による化学反応システム [10] も、単純な自己複製を禁ずるという制約を与えたものの、ネットワークの自己組織化と、その規模、複雑さという点において解決を与えた。また、ここでの反応はポピュレーションダイナミクスではなく、個体ベースの、すなわち、反応を各個体で個別に考えるものであった。しかし問題点としては、全ての化学物質は、全て等しい確率で反応する（攪拌された系に対応する）ため、これもネットワークを別々に発展させなければ、ネットワーク同士の相互作用をみることはできないという点が挙げられる。

従って、反応の個別性、多様性を持たせるためには、個体ベースで反応をおこない、かつ、個体による環境の差がつくように空間構造を導入することが必要であると考えられる。この空間構造を導入することにより、局所的な反応が実現できると思われる。

そのためここでは、池上・橋本によって提案された、大規模かつ多様なネットワークを構成する、記述テープとそれを解釈するマシンのモデルに空間構造を導入したものをを用いる。

第 2 章

モデル

本章では、池上・橋本によって提案された、記述テープとそれを解釈するマシンのモデルを本研究の目的に添うように改良する。池上・橋本によるモデルは本来ポピュレーションダイナミクスで、化学種の濃度が変化するものであるが、ここでは反応の個別性を保持し、系全体での反応の多様性を実現するため、反応はポピュレーションダイナミクスでなく、個体ごとに起きる。また、それぞれのテープ、マシンは空間座標を持ち、平均自由行程に従ってランダムウォークする。

モデルは二種類の存在である、テープ、マシンから構成される。これらの模式図を図 2.1 に示す。テープは 7 bit の円環状の 2 進列である。本論では 7bit のテープを 2 桁の 16 進数で表現する（例： T_{3f} ）。またテープはマシンによって読まれ始める位置であるソースをもつ¹。マシンはチューリングマシンのようなオートマトンで、ヘッド、テールおよび、遷移表の 3 つの部分からなる。おのおの 4 bit の 2 進列で表されるヘッド、テールはそれぞれテープとのマッチングに使用される。また、8 bit の 2 進列遷移表は 4 種類の状態遷移を表す。本論では計 16bit の 2 進列からなるマシンを 4 桁の 16 進数で表す（例： $M_{df fb}$ ）。マシンを表現するビット列とヘッド、テール、遷移表の関係は図 2.3 の上部のようになっている。

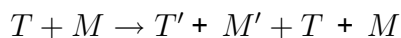
いま、 σ^T, σ^M はそれぞれテープとマシンの現在の状態を表し、 σ'^T, σ'^M が状態遷移後のテープとマシンの状態を表すとする。このとき、遷移表の 8 bit の 2 進列は、4 種類の状態遷移 $(\sigma^T, \sigma^M) \rightarrow (\sigma'^T, \sigma'^M)$ の右辺を表す。

¹詳しくは 2.2 テープ上の探索開始点参照。

2.1 テープとマシンの反応

テープとマシンの反応の模式図を、図 2.2 に示す。マシン M は、テープ T 上のある位置² からヘッドとのパターンマッチングを行う。テープ T 上にヘッドのパターンが見つかった場合、再びテープ T 上の、マシンがヘッドの探索を開始した位置から、今度はテールとのパターンマッチングを行う。ヘッド、テール両方のパターンがテープ T 上の別の位置に見つかった場合のみ、テープ T とマシン M は反応する³。ヘッドとテールのパターンが見つかった例を図 2.3 下部に示す。

反応において、マシン M は、テープ T 上に見つかったヘッドのパターンの先頭から、テールのパターンの手前までを、マシン M 自らの遷移表に従って書替えた新たなテープ T' を作る。この際、マシンの初期状態はランダムに 0, 1 の値を取る。テープの書替えの過程を図 2.4 に示す。テープ T' が作られると、さらにそのテープ T' からマシン M' が翻訳され、新たなマシンが生成される⁴。以上の過程を化学反応風に表現すると次のようになる。



²この位置をソースという。詳しくは 2.2 テープ上の探索開始点参照。

³この際、テープ、マシンを作るための資源には限りがあり、反応する確率は資源からの制約を受ける。詳しくは 2.5 資源制約参照。

⁴テープからマシンへの翻訳の方法は 2.3 テープの翻訳参照。

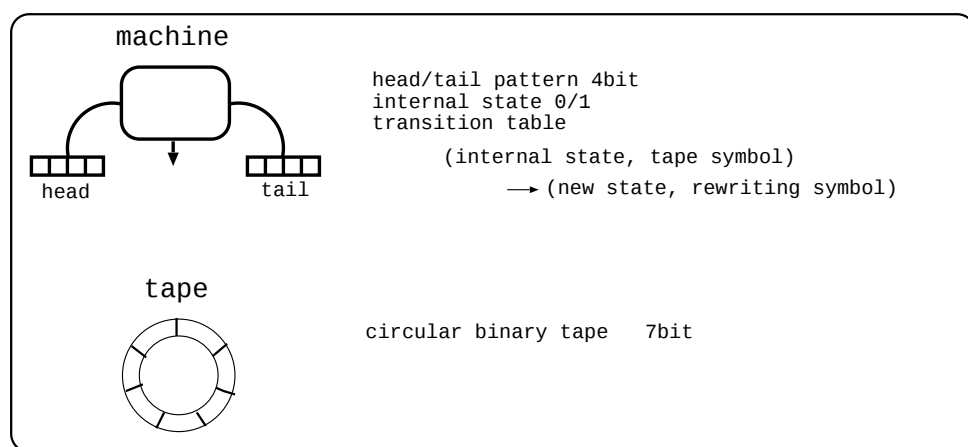


図 2.1: テープ, マシンの模式図

マシンはヘッド, テール, 及び遷移表の部分からなり, 1, 0 の内部状態を持つ。またテープは円環状の 7bit の 2 進列である。

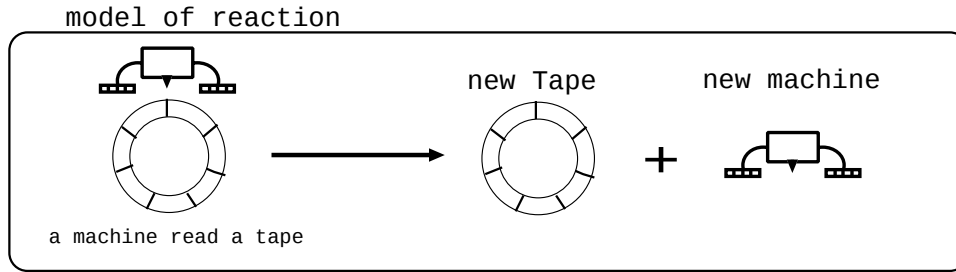


図 2.2: テープ, マシンの反応の模式図

マシンがテープに取り付き, ヘッドとテールにあたるパターンが別々の場所に見つかるかどうかをチェックする。見つかった場合は反応が起き, 新しいテープと, それから翻訳された新しいマシンができる。

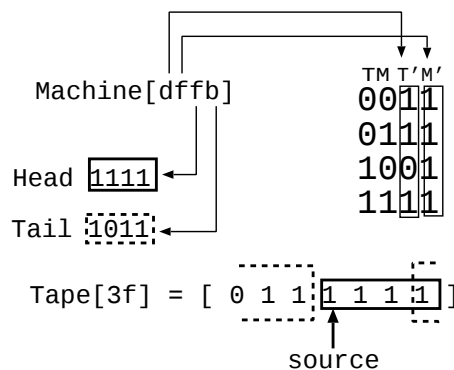


図 2.3: マシンのヘッド, テール, 遷移表との対応, 及びテープ上の探索
遷移表の上部 T,M の列は現在の状態, T',M' の列は遷移後の状態を表す

2.2 テープ上の探索開始点

それぞれのテープは, マシンによってヘッド, テールを探索されるある決まった起点を持っている。これをソースと呼ぶ。テープの持つソースは, 最初はランダムに決められ, 同じ種類のテープについては全て同じである。もし, ある種類のテープが絶滅した場合, その後新たにその種類のテープが作られるときにはソースは新たにランダムに決定される。

	Machine state
[0 1 1 <u>1</u> 1 1 1]	0
[0 1 1 0 <u>1</u> 1 1]	1
[0 1 1 0 1 <u>1</u> 1]	1

[0 1 1 0 1 1 1] = Tape[37]

図 2.4: マシンによるテープ書替え

図 2.1 のマシン dffb, テープ 3f についての反応を示す。点線の四角で囲まれているのが現在マシンが読んでいるテープの位置。マシンの初期状態はここでは 0 となっている。

2.3 テープの翻訳

新しく反応によって生成したテープ T' からは, 新しいマシン M' が翻訳される。7bit のテープから, 16bit のマシンを構成するため, テープはくりかえし読まれる。翻訳はまず, 新しいテープ T' のヘッドを 1 番目として, ひとつおきに, 1,3,5,7 番目の 4bit が 1 番目を最上位ビットとしてマシンの遷移表の前半部に, 2,4,6,1 番目の 4bit がマシンの遷移表の後半部にそれぞれ翻訳される。その後テープのその次の bit, すなわち 2,4,6,1 番目がマシンのヘッド, 3,5,7,2 番目がマシンのテールにそれぞれ翻訳される。

翻訳を開始する位置については 2 種類ある。ひとつは反応する際のヘッドの位置, もうひとつはテープのソースである。

これらはそれぞれ別のモデルとして実験を行う。ヘッドの位置からの翻訳の過程を図 2.5 に示す。

2.4 テープ, マシンの動力学

テープ・マシンは各々座標を持って空間内に散らばっており、それぞれランダムウォークする。一回に移動する距離は, ある距離 l_0 のまわりに指数分布しているものとする。この l_0 を平均自由行程という。テープ, マシンはそれぞれ共通の平均自由行程 l_0 を持つ。さらにテープ, マシンは一定の寿命を持ち, 作られてから一定の時間で消滅する。

またマシンは反応可能半径を持ち、半径内のテープのいずれかとランダムに出会う。マ

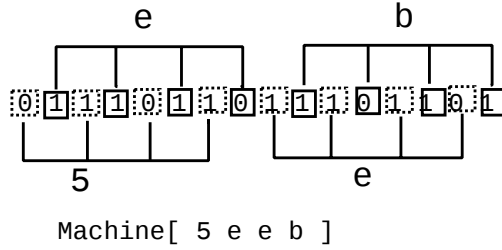


図 2.5: テープの翻訳

図 2.3 のマシン dffb, テープ 3f の反応から作られた, テープ 37 の翻訳の過程を示す。テープはヘッドまたはソースの位置から翻訳される(ここではヘッドから)。7bit のテープから, 16bit のマシンを構成するため, テープはくりかえし読まれる。

シン M とテープ T は出会ったとき, 資源制約に基づくある確率で⁵ マシン M はテープ T と反応可能かどうか, すなわち, ヘッドとテールが別の場所に見つかるかを調べる。この反応から, テープ T' およびマシン M' が新しく作られた場合, それらは反応するテープ T , マシン M の中間の位置に生じるものとする。

2.5 資源制約

システム全体は同一の資源を用いるという前提で資源制約を導入する。具体的には, 2 種類の資源制約がある。

ひとつは, MAX を全体の総数の上限としたとき, 系全体での反応の確率が (MAX - 全体) に比例するというものである。これは, 資源の拡散がテープ, マシンの活動に対して充分速い場合に相当し, 系全体に等しく資源制約が存在することになる。そのため, これを大域的資源制約と呼ぶ。

もうひとつは, あるマシンの反応確率を, その周囲の半径 r_g 以内にあるマシンの数に応じて変化させるというものである。この変化のさせ方は, ある正規分布型の関数を用いて計算され, 周囲にあるマシンの数がある数のときに関数が最大となり, 周囲にあるマシンの数がある数から離れると徐々に小さくなるようなものである。このとき用いる関数

⁵詳しくは 2.5 資源制約参照。

は，以下のようなものである。

$$f(x) = max \cdot e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

この形の資源制約を採用する全てのモデルにおいて， $max = 50, \mu = 6, \sigma = 1.7$ とした。また，全てのモデルにおいて $r_g = 0.01$ とした。このときの反応確率，及び半径 r_g 内の他のマシンの個数との関係を図 2.6 に示す。

これは，資源の拡散が前述のものより遅い場合に相当し，局所的に資源制約が存在することになる。そのため，これを局所的資源制約と呼ぶ。2 種類の資源制約はそれぞれ別のモデルとして実験を行う。

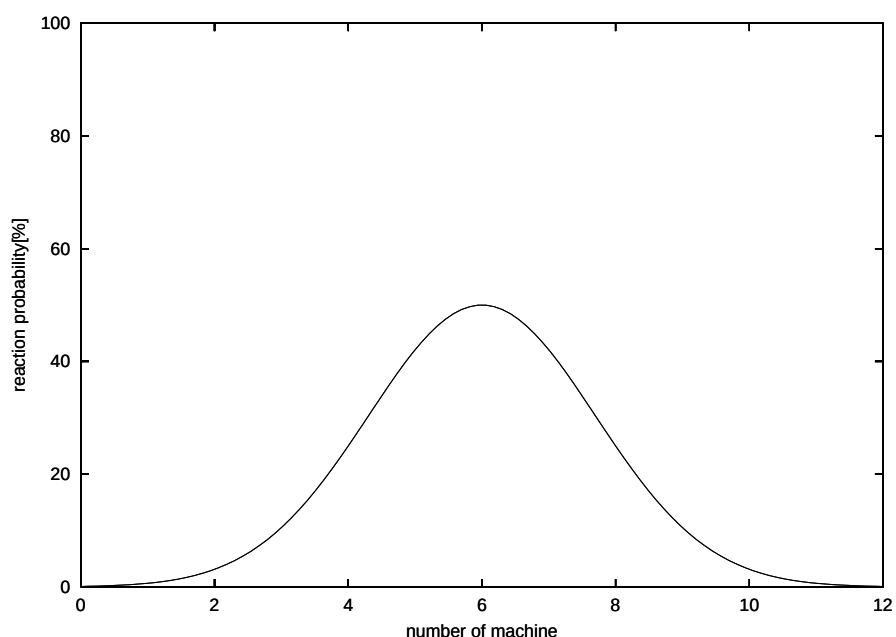


図 2.6: 局所的資源制約における，反応確率，及び半径 r_g 内の他のマシンの個数との関係

縦軸は反応確率，横軸は r_g 内の他のマシンの個数を表す。

2.6 モデルの種類

モデルにおいては，テープの翻訳のされ方，資源制約がそれぞれ 2 種類ずつある。そのため，モデルは 4 つ存在し，実験はそれぞれの組み合わせについて行う。

第 3 章

シミュレーション結果

第 2 章で導入したテープとマシンのモデルがどのようなふるまいをするかを，コンピューターシミュレーションにより調べた。

シミュレーションは翻訳の開始位置，資源制約のそれぞれの 2 種類の計 4 種類の組み合わせによるモデルで行った。この 4 種はそれぞれ表 3.1 のように呼ぶことにする。

表 3.1: モデルの種類

		資源制約	
		大域的	局所的
翻訳開始位置	ヘッド	Hg	Hl
	ソース	Sg	Sl

また，初期のテープ，マシンの数は各 500，テープ，マシンの最大数を各 1000 とする。空間は 1 次元で，座標の取り得る値は $(0 \sim 1)$ であり，これは周期境界条件を持つものとする。

その他のパラメータとしては，拡散係数，テープ，マシンの寿命，マシンの反応可能半径がある。これらのパラメータは，各実験ごとに变化させる。

3.1 モデルHg,HIの全般的な性質

3.1.1 空間構造の影響がない場合

モデルHgについて、テープ、マシンの平均自由行程を共に大きくとり、マシンの反応可能半径は空間の全域としたパラメータについて実験を行った。具体的なパラメータは平均自由行程を0.05、テープ、マシンの寿命を50ステップ、マシンの反応可能半径を0.5とした。これは空間構造による影響の無い、テープとマシンの反応の性質を調べるためである。以下にここで観察された現象を示す。

- 自己複製と確率的自己複製

まず、全体の時系列に対してもっとも影響が強いのは自己複製できるテープ・マシンの存在である。ここでいう自己複製とは、あるマシンとテープが反応して、まったく同じテープとマシンを作ることができるような反応のことである。このモデルではそのような組み合わせが5種類存在する。この5種類が自己複製できるか否かは、テープのソース、及びマシンの初期状態に依存する。テープのソースが特定の位置でない場合、その組み合わせは自己複製できない。

またマシンはテープを読み始める際、初期状態がランダムに決まるため、自己複製可能なマシンとテープが反応しても自己複製できない場合もある。初期状態によって自己複製が左右される組み合わせによる反応を確率的自己複製と呼ぶ。そうすると先ほど述べた5つのうち、 (T_{1d}, M_{9dd3}) 、 (T_{37}, M_{bdd7}) 、 $(T_{3f}, M_{df fb})$ が確率的自己複製が可能な組み合わせである。確率的自己複製が可能な組み合わせよりも自己複製が可能な組み合わせのほうが増加の速度は当然早くなる。

そのため、 (T_1, M_{1002}) 、 (T_1, M_{2004}) のいずれかが自己複製可能なときはほとんどの場合、この組み合わせだけが全体を占めることになる。 (T_1, M_{1002}) の自己複製が起きているときの各テープの時系列を図3.1に示す。

- 寄生的関係

(T_1, M_{1002}) 、 (T_1, M_{2004}) のいずれかが自己複製可能であっても、 T_5 が存在すると、 T_5 は M_{1002} 、 M_{2004} と反応して T_5 と M_{3006} を生成する。この際に生成される M_{3006} は T_1 、 T_5 のいずれとも反応できないため、 T_5 は T_1 の生成する M_{1002} 、 M_{2004} と反応することでしか、自己を生成できない。この関係を図3.2に示す。 T_5

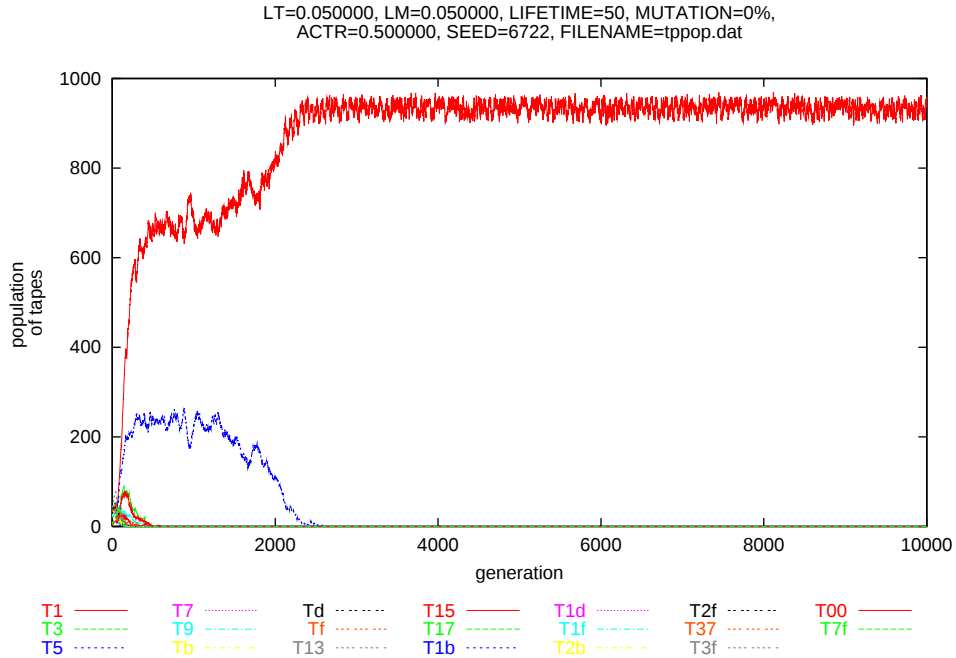


図 3.1: (T_1, M_{1002}) による自己複製の際の，各テープの時系列グラフ

縦軸は各テープのポピュレーション，横軸はステップ数を表す。最初の 50～200 ステップは初期状態により作られたランダムなマシン，テープの影響が残っている。これらは，以下の各テープの時系列グラフにおいても同様である。ここでは， (T_1, M_{1002}) による自己複製が全体を支配している。

が M_{1002} と反応することで， T_1 と反応する M_{1002} の数は減少する。そのため， T_5 の増加は， M_{1002} ， M_{2004} の生産を抑制し，結果としてテープ，マシンの総数の振動，あるいは絶滅をもたらす。よって T_5 は (T_1, M_{1002}) ， (T_1, M_{2004}) の反応のネットワークに対して寄生的関係にあるといえる。このときの各テープの時系列を図 3.3 に示す。

このように寄生的関係とは，あるネットワーク N があるとき，あるマシン M ，またはテープ T がネットワーク N の生成物と反応し，ネットワーク N の構成以外のテープ，マシンしか作らない関係である。

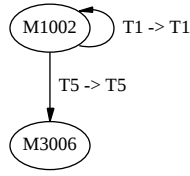


図 3.2: (T_1, M_{1002}) が T_5 に寄生されている際のネットワーク図

$T_1, T_5, M_{1002}, M_{3006}$ の関係。ノードはそれぞれ各マシンを表し，矢印の向きは親 M_A から子 M_B へと向いている。また矢印の横に書いてある， $T_A \rightarrow T_B$ は T_A が親テープ， T_B が子テープを表す。これらは，反応式で書くと， $T_A + M_A \rightarrow T_B + M_B$ となる反応を表している。本来 T_1 と反応する分の M_{1002} を T_5 が奪ってしまい，どのテープとも反応しない M_{3006} を作る。

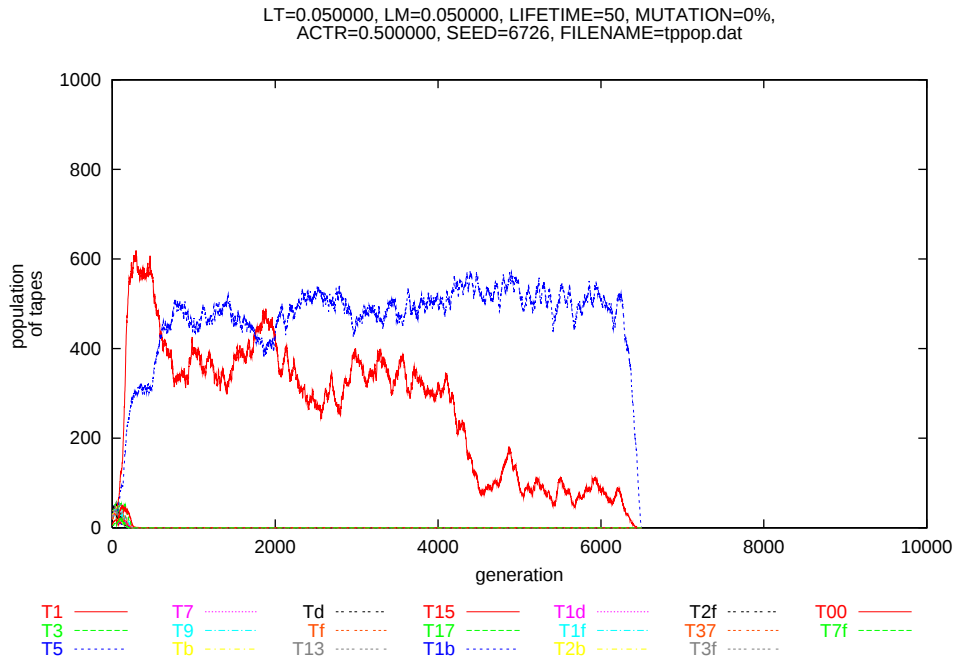


図 3.3: (T_1, M_{1002}) が T_5 に寄生されている際の，各テープの時系列グラフ

T_5 による寄生的関係がみられる。 T_5 が増加しすぎると，寄生されていた (T_1, M_{1002}) が絶滅してしまう。

- 確率的自己複製の副産物によるネットワーク

(T_1, M_{1002}) , (T_1, M_{2004}) が自己複製をできないような場合には, 他の状態として, 確率的自己複製のもたらすネットワークが成立することがある。その例が, $(T_{3f}, M_{df fb})$ の組み合わせによる反応である。この場合, 自己複製以外の反応で生成される副産物はそれら自体でさらに反応し, さらなる生成物を作り出す。副産物の反応は成長し, もとの $(T_{3f}, M_{df fb})$ を生み出すことで全体をネットワークとして恒常的に維持する。このときの代表的な時系列を図 3.4 に, 1000 ステップから 1200 ステップまでの反応のうち, お互いを作りあう関係のもののみを描いたネットワークを図 3.5 に示す。また, 初期状態を 50 個の $(T_{3f}, M_{df fb})$ のみで始めたときのネットワークの成長過程を, マシンをノードとする, 互いの生成関係を表す有向グラフで示す (図 3.6 - 3.10)。

このような現象は, 他の確率的自己複製可能な組み合わせには見られない。例えば, (T_{37}, M_{bdd7}) の組み合わせにおいては, 副産物同士がほとんど反応しないか, 反応してもさらなる生成物がどのテープ, マシンとも反応できない。そのため, 副産物の生成は結果的に自己複製を抑制し, 全テープ, マシンは絶滅する。

また, (T_{1d}, M_{9dd3}) の組み合わせにおいても, 同様の理由により自己維持可能なネットワークができることは無い。さらにこの組み合わせにおいては, 副産物の反応が (T_1, M_{1002}) の組み合わせを生成する場合があります, この組み合わせが自己複製可能な場合にはこれだけが全体を占めることになる。

したがって, 確率的自己複製の副産物によってネットワークが形成されるのは, $(T_{3f}, M_{df fb})$ の組み合わせがある場合のみである。

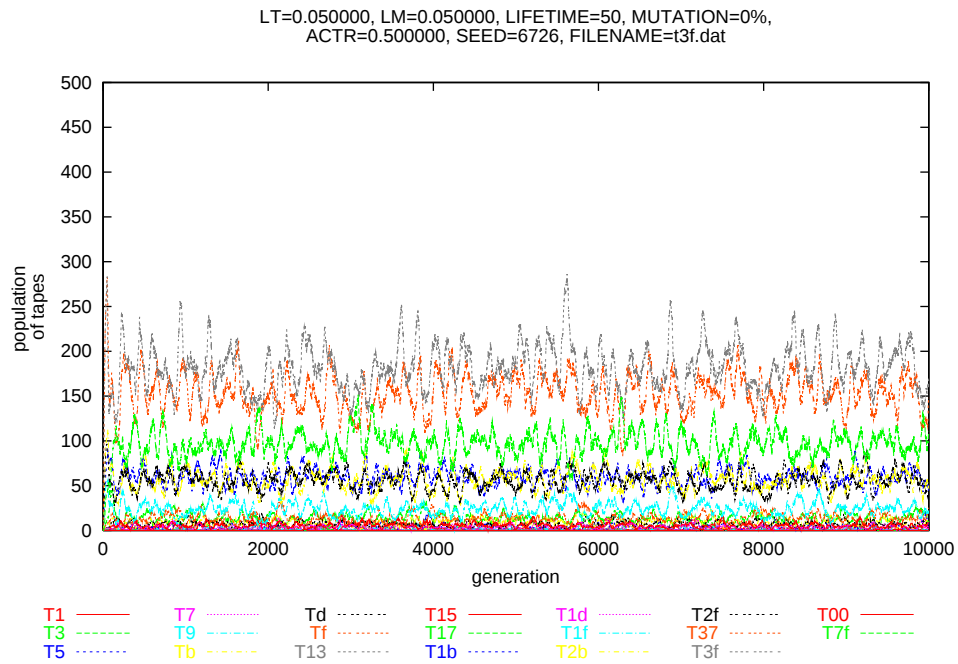


図 3.4: (T_{3f}, M_{dfb}) による確率的自己複製の際の，各テープの時系列グラフ

自己複製の場合と異なり，多様なテープが作り出され，維持されている。

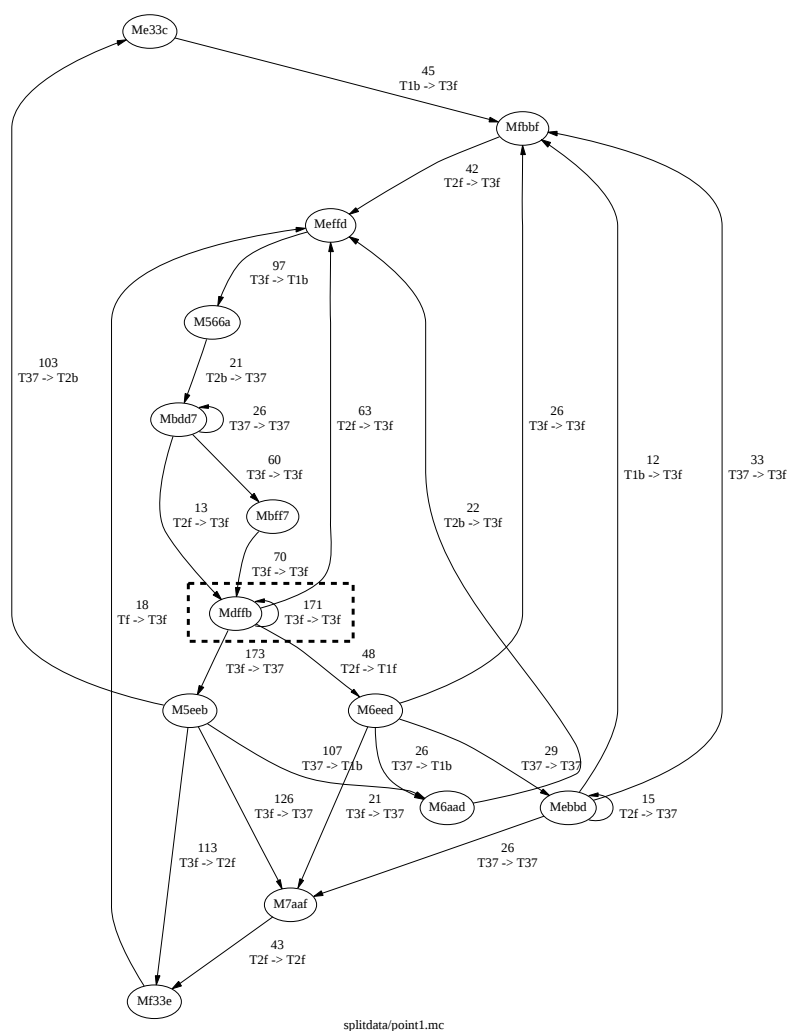


図 3.5: (T_{3f}, M_{dfbf}) による確率的自己複製の際の、主な反応のネットワーク

1000 ~ 1200 ステップの間に起きた反応をネットワークとして表したものの。ノードはそれぞれ各マシンを表し、矢印の向きは親 M_A から子 M_B へと向いている。また矢印の横に書いてある $T_A \rightarrow T_B$ は T_A が親テープ、 T_B が子テープを表し、その上の数字は 200 ステップ間でのその反応の回数を表す。これらは、反応式で書くと、 $T_A + M_A \rightarrow T_B + M_B$ となる反応を表している。 (T_{3f}, M_{dfbf}) (点線内) は確率的自己複製を行うが、その際の副産物としてほぼ同数の (T_{37}, M_{5eeb}) を作り出す。 M_{5eeb} は T_{37}, T_{3f} とそれぞれ反応することができ、新たなテープ、マシンを生成する。この反応の連鎖は (T_{3f}, M_{dfbf}) に帰ってすることで恒常的に続く。

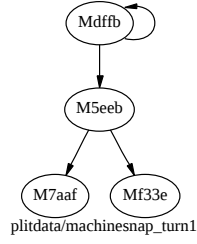


図 3.6: 初期状態として 50 個ずつの T_{3f} , $M_{df\ fb}$ を配置したときのネットワークの発展 (ステップ = 1)

まず, M_{5eeb} が作られ, さらに他のマシンが作られる。

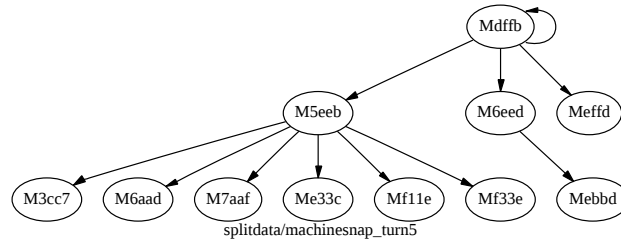


図 3.7: 初期状態として 50 個ずつの T_{3f} , $M_{df\ fb}$ を配置したときのネットワークの発展 (ステップ = 5)

$M_{df\ fb}$, M_{5eeb} は他のマシンが作るテープから, さらに異なるマシンを生成する。

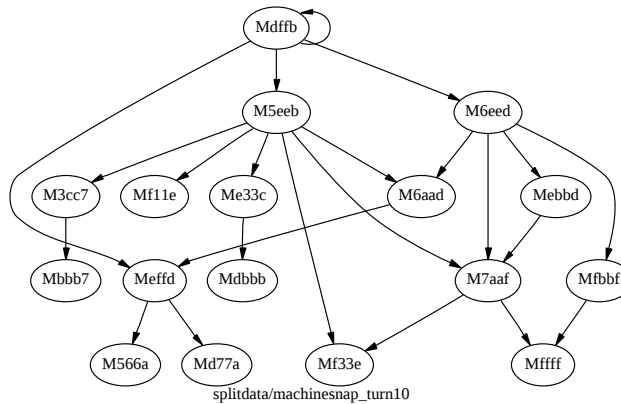


図 3.8: 初期状態として 50 個ずつの T_{3f} , $M_{df\ fb}$ を配置したときのネットワークの発展 (ステップ = 10)

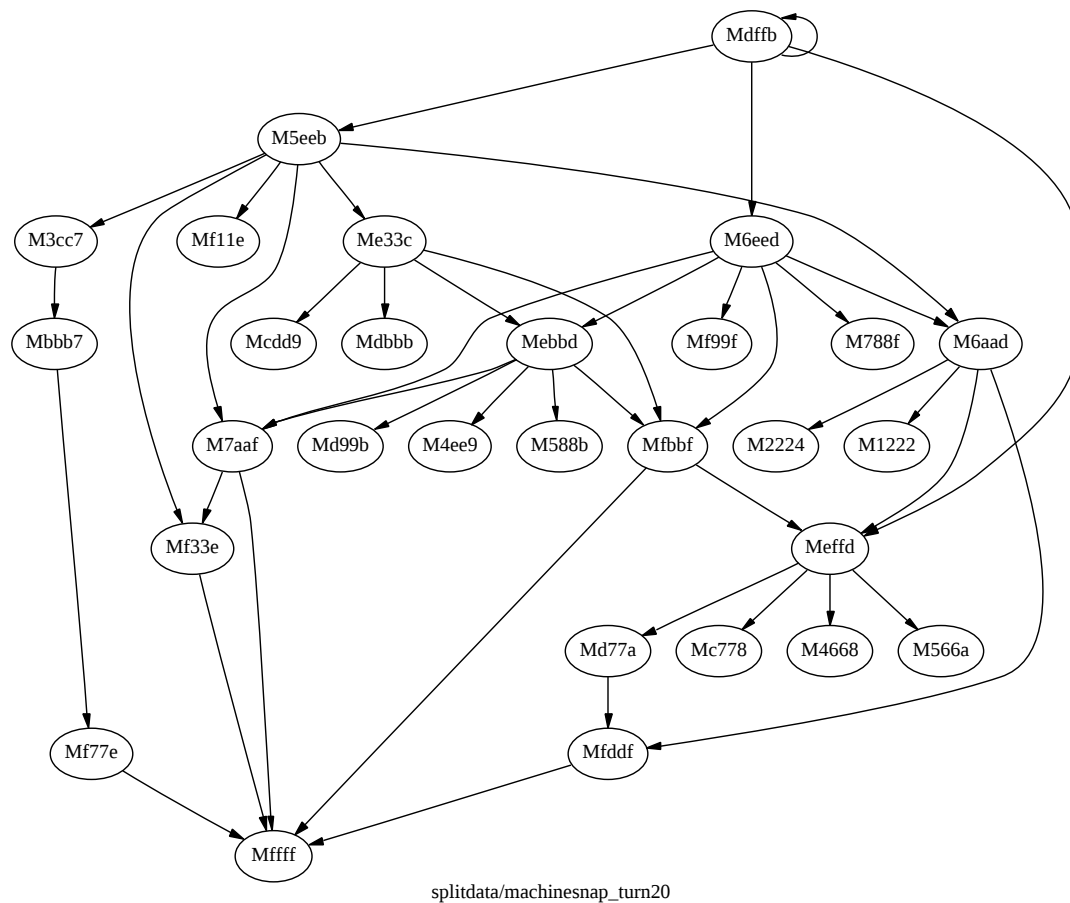


図 3.9: 初期状態として 50 個ずつの T_{3f} , $M_{df\,fb}$ を配置したときのネットワークの発展 (ステップ = 20)

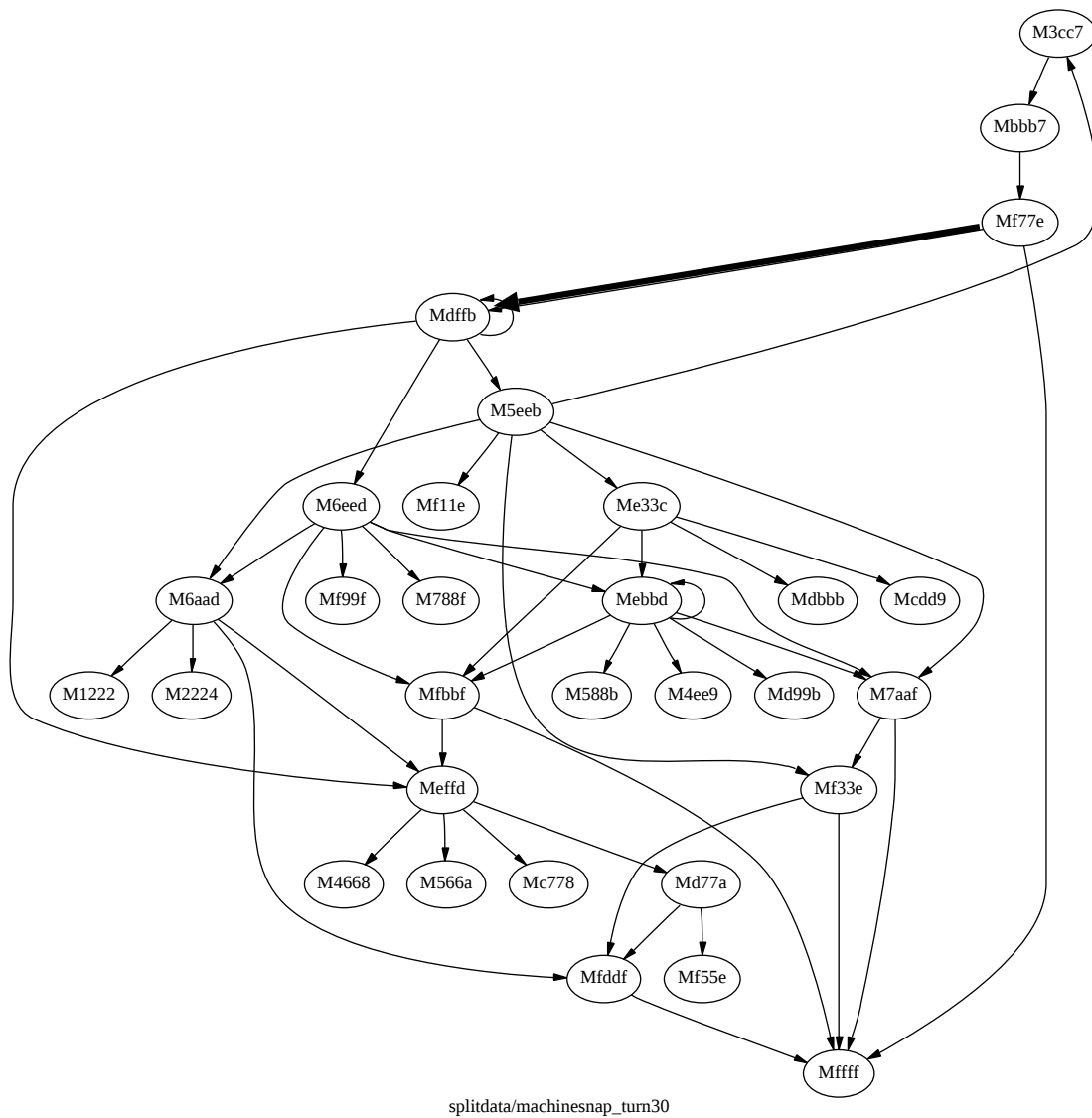


図 3.10: 初期状態として 50 個ずつの T_{3f} , M_{dfb} を配置したときのネットワークの発展 (ステップ = 30)

成長した反応の連鎖は, 太い矢印で示された反応により (T_{3f} , M_{dfb}) によるもとの反応の組み合わせを再び作り出すことで, 全体をネットワークとして維持する。

- コアネットワーク

先程と同様に， (T_1, M_{1002}) ， (T_1, M_{2004}) が自己複製をできないような場合には，確率的自己複製の副産物によるネットワークではない，マシン，テープの両方が相互に作り合うような安定したネットワークができる場合がある。これをコアネットワークと呼ぶ。互いに作り合うという意味においては，前述の確率的自己複製の副産物によるネットワークもこれに当てはまる。しかし，確率的自己複製の副産物によるネットワークの場合には，中心となる (T_{3f}, M_{diffb}) 以外を強制的に消去してもネットワークは復元する。一方多くのコアネットワークの場合には，中心となる反応ネットワークは非常に多くのマシンとテープから構成されており，どのテープ，マシンが主要なものかの判別がしがたい。そのためここでは，確率的自己複製の副産物によるネットワークと，コアネットワークを区別した。

ここで，観察されたコアネットワークにおける各テープの時系列を図 3.11 に示す。また，3500～3700 ステップの間に起きた反応のうち，10 回以上反応が起きているものを有向グラフとして図 3.12 に示す。さらに，図 3.12 のなかから，閉路をなしているもののみを図 3.13 に示す。

モデル Hg においては，コアネットとみられるのはこれらの図に示されているものだけであった。

- まとめ

翻訳開始位置をヘッドとした場合には，自己複製が 2 つ，確率的自己複製によるネットワークが 1 つ，コアネットが 1 つの計 4 つの状態を確認した。また，これらの状態は，大域的，局所的のいずれの資源制約を採用したときについてもみられ，その挙動は特に変わらない。

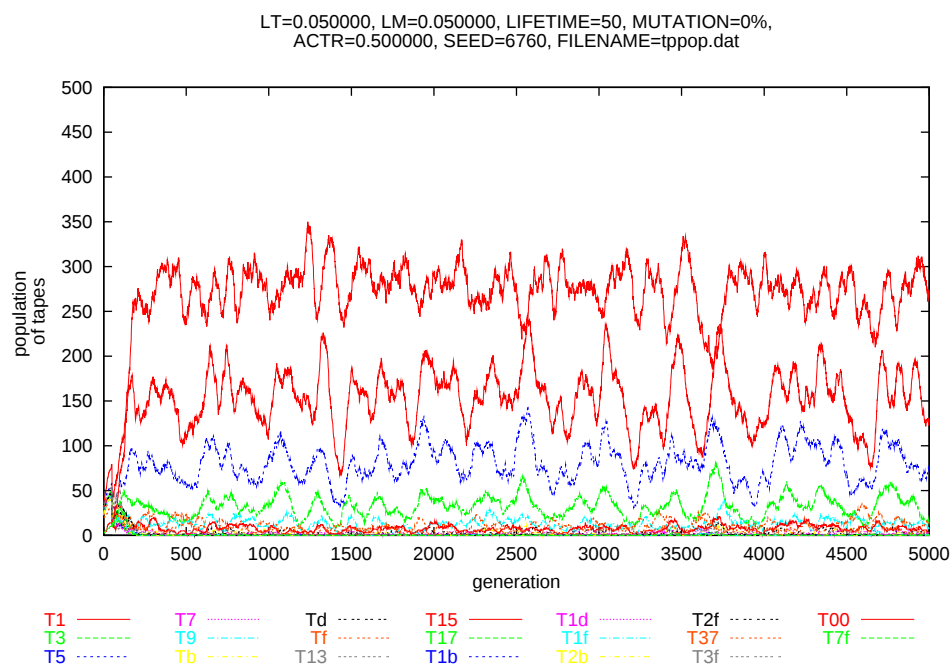


図 3.11: 観察されたコアネットワークにおける各テープ時系列

図 3.4 と同様に，多様なテープが作られ，維持されている。

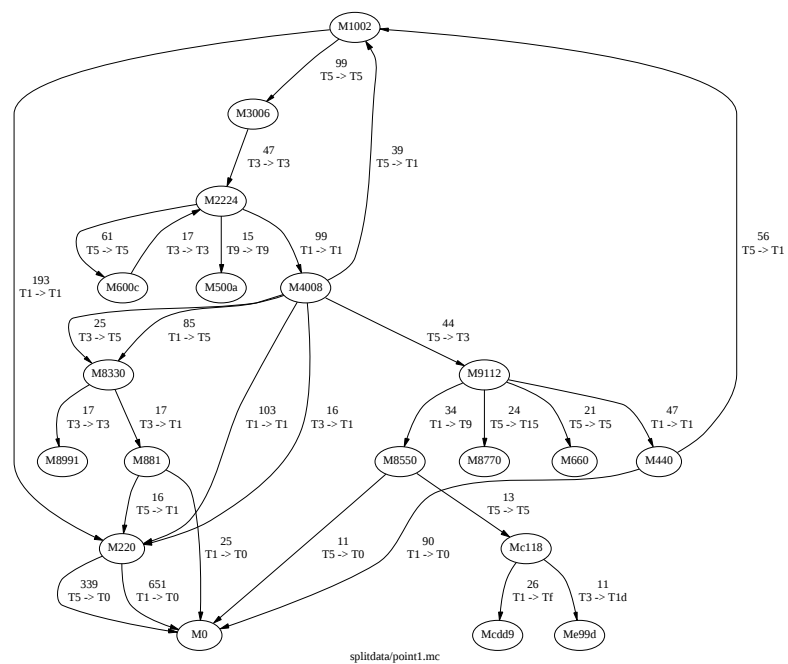


図 3.12: 図 3.11 における主な反応 (ステップ = 3500 ~ 3700)

ループとなっていないような反応も多く起きていることがわかる。

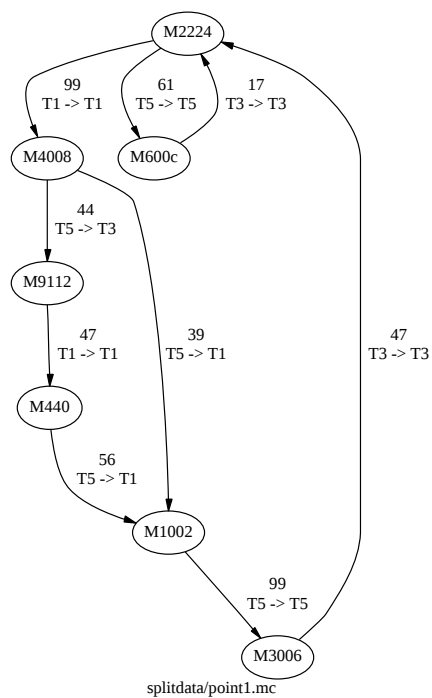


図 3.13: 図 3.11 の反応を構成する主要なネットワーク (ステップ = 3500 ~ 3700)

この場合実際に，ループになっている反応は少ない。このループを構成するマシンのタイプに対する反応の多様さが図 3.13 のような複雑な反応経路を生じさせる。

3.1.2 空間構造の影響がある場合

ここでは具体的なパラメータは平均自由行程を 0.002, テープ, マシンの寿命を 50 ステップ, マシンの反応可能半径を 0.02 とした。これは空間構造の影響する場合の, テープとマシンの反応の性質を調べるためである。

- 大域的資源制約 (モデル Hg)

このモデルでは, 複数の反応ネットワークが異なる空間位置で並存していても, 成長率の早いものがある程度成長してしまうと, 系全体の反応を抑制してしまう。このため, 一時的に局所的な反応が起きることはあっても, 最終的には 1 箇所だけの反応しか残ることはない。

- 局所的資源制約 (モデル Hl)

このモデルでは, マシンの密度がある一定のときに反応確率が最大になるため, 結果として, 最終的には空間全域が均一な密度となり, 全域で均一な反応が起こるようになりやすい。

また, 空間構造の影響の無いパラメータで観察された 4 種類のネットワークが並存する状態はみられなかった。

3.2 モデル Sg,Sl の全般的な性質

3.2.1 空間構造の影響がない場合

ここでは, 具体的なパラメータは平均自由行程を 0.05, テープ, マシンの寿命を 50 ステップ, マシンの反応可能半径を 0.5 とした。これは空間構造による影響の無い, テープとマシンの反応の性質を調べるためである。その結果, テープ, マシン間に, モデル Hg, Hl で見られたものと同様の性質を見出すことができた。

- 自己複製と確率的自己複製

具体的には, 自己複製可能な組み合わせは 6 種類, 確率的自己複製可能な組み合わせは 10 種類存在する。

- 寄生的関係

モデル Hg, Hl と同様である。

- 確率的自己複製の副産物によるネットワーク

モデル $H_{g,HI}$ と同様，副産物がネットワークを形成するものとそうでないものがある。

- コアネット

モデル $H_{g,HI}$ に比べて多くの種類のコアネットを確認した。

3.2.2 空間構造の影響がある場合

ここでは，具体的なパラメータは平均自由行程を 0.002，テープ，マシンの寿命を 50 ステップ，マシンの反応可能半径を 0.02 とした。これは空間構造の影響する場合の，テープとマシンの反応の性質を調べるためである。

- 大域的資源制約

モデル $H_{g,HI}$ の場合と同様，一時的に局所的な反応が起きることはあっても，最終的には 1 箇所だけの反応しか残ることはなかった。

- 局所的資源制約

1 種類のネットワーク（自己複製，確率的自己複製も含む）が全体を支配するが，ネットワークの種類が多いため，2 種，あるいはそれ以上が独立して活動することもある。また初期状態によってはこのような並存するネットワークによって空間パターンが作られ，維持されることもある。

3.3 並存するネットワーク間の関係

翻訳開始位置をソースとしたモデル $S_{g,SI}$ では，異なる種類のネットワークが並存する状態が多く見られる。しかし，その際のネットワーク同士の関係はそれぞれ異なる。ここでは，観察されたネットワーク間の関係について述べる。

3.3.1 観察されたネットワークとその関係

空間構造の影響が無い場合

空間的に一様な反応が起きている場合にも，異なる種類のネットワークが並存することがある。ここではそのようなものについて述べる。

具体的なパラメータは平均自由行程を 0.05，テープ，マシンの寿命を 50 ステップ，マシンの反応可能半径を 0.5 とした。これは空間構造が影響しない場合の，テープとマシンの反応の性質を調べるためである。

例 1 単独で維持でき利他的なネットワーク A と，単独で維持できず寄生的なネットワーク B

二つの反応ネットワークが並存し，一方は単独で存在できるが，他方はもう一方に依存するような場合がある。このときの各テープの時系列を図 3.14 に，主なネットワークを図 3.15 に示す。図 3.15 では，太枠内のネットワーク A から点線内のネットワーク B に対してパスは伸びているが，逆の反応経路は無い。また，反応が定常的に起こっている際にネットワーク B を一時的に消去しても，ネットワーク A の活動は変化せず，ネットワーク B は再生する。しかし，ネットワーク A を消去すると，全体が絶滅してしまう。そのため，二つのネットワークは，単独で維持でき利他的なネットワーク A と，単独で維持できず寄生的なネットワーク B とみることができる。

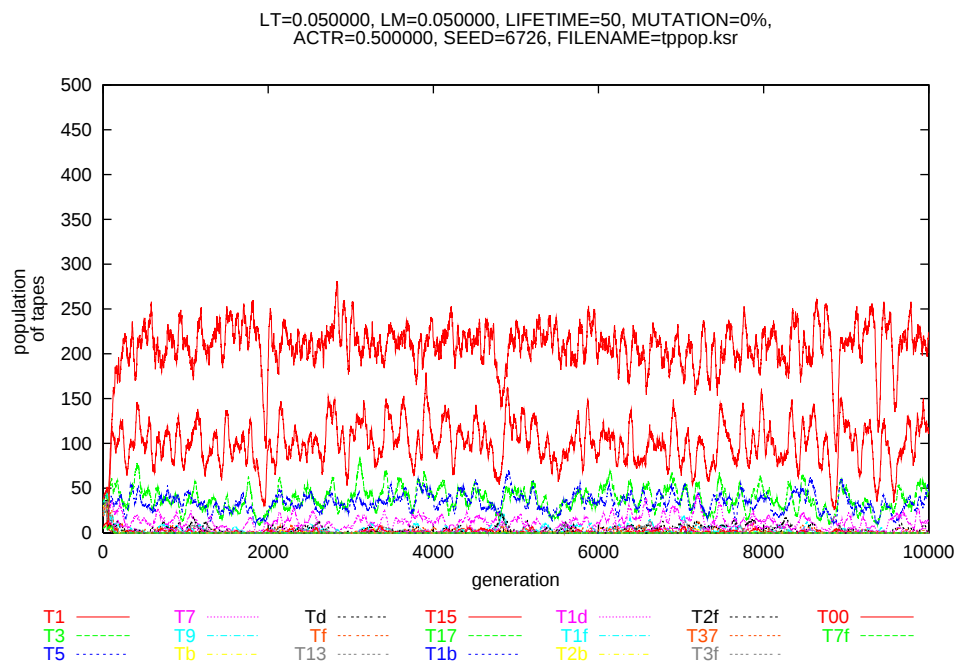


図 3.14: 例 1 における各テープの時系列

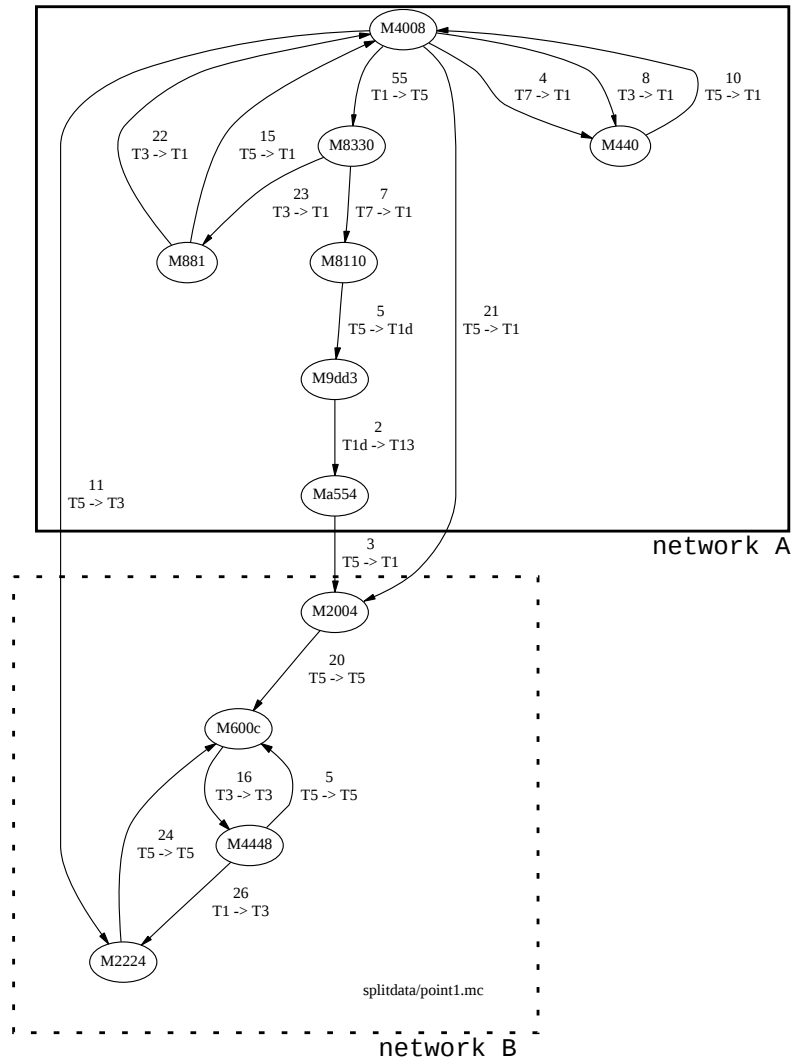


図 3.15: 例 1 における主なネットワーク (ステップ = 9000 ~ 9200)

ネットワークは閉路のみを描いた。ネットワーク B は、ネットワーク A の生成するマシン M_{2004} , M_{2224} が無ければ存続できない。しかし、ネットワーク A はネットワーク B に依存していないため、単独で維持することができる。

例 2 単独で維持でき寄生的かつ利他的なネットワーク A , B

二つの反応ネットワークが並存し、互いを作り合いかつ利用し合う場合がある。このときの各テープの時系列を図 3.16 に、主なネットワークを図 3.17 に示す。 (T_{2f}, M_{3ee7}) の自己複製によるネットワーク A (図 3.17 の太枠内) は単独でも維持できるが、他のテープ T_{3f} 等があると、他のテープ、マシンを生成するという利他的側面を持つ。また、自らの作るテープ T_{2f} を介して自らのマシン、テープを作らせる寄生的側面を持つ。いっぽうネットワーク B (図 3.17 の点線内) も単独で維持でき、 T_{2f}, M_{3ee7} を作り出すという利他的な側面もあるが、他のテープを介して、 M_{3ee7} にネットワーク B 内のテープ、マシンを生成させるという寄生的側面を持つ。

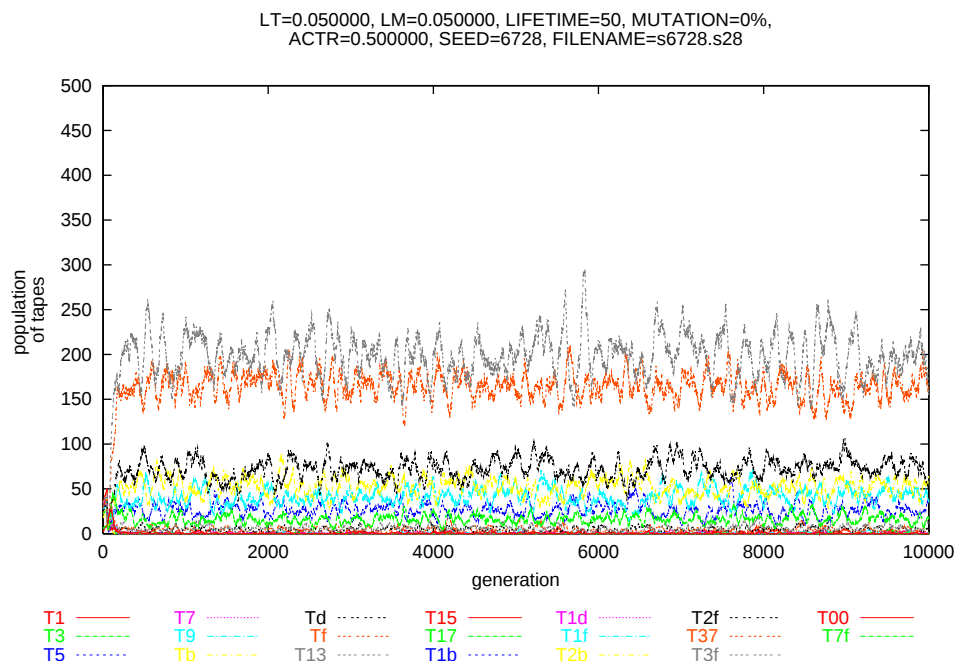


図 3.16: 例 2 における各テープの時系列 (ステップ = 3500 ~ 3700)

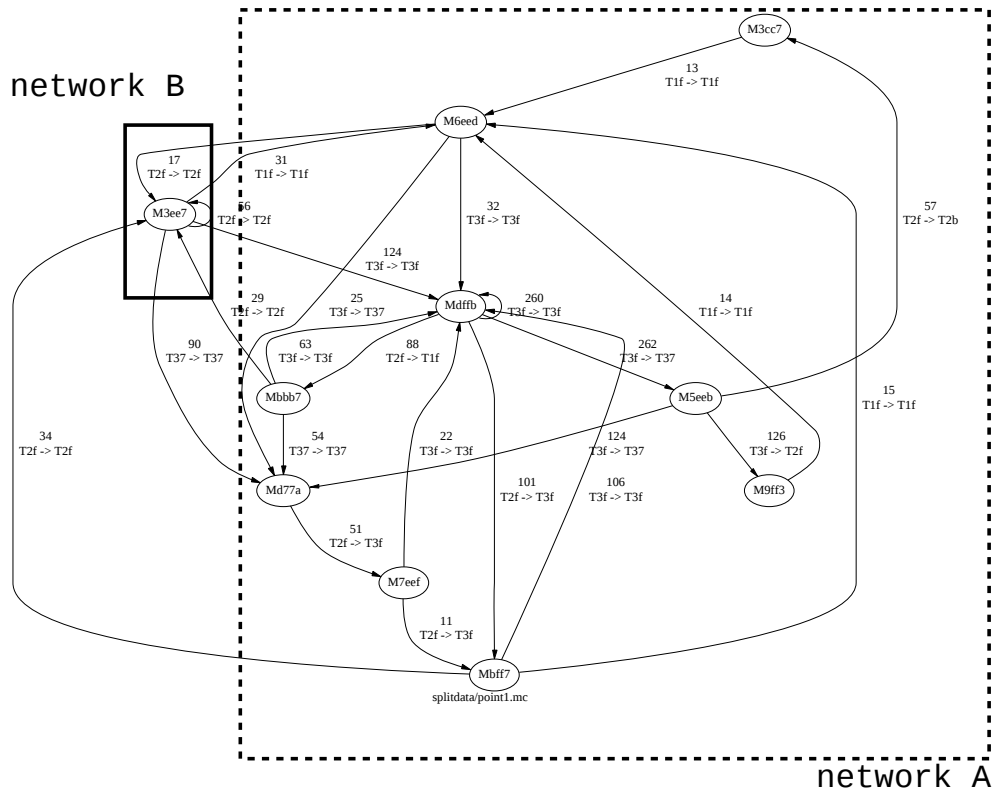


図 3.17: 例 2 における主なネットワーク (ステップ = 9000 ~ 9200)

ネットワークは閉路のみを描いた。ネットワーク A は (T_{3f}, M_{dfb}) の組み合わせによる確率的自己複製の副産物を作るネットワークである。また, ネットワーク B は (T_{2f}, M_{3ee7}) の組み合わせによる自己複製である。お互いは, 単独で維持することができるが, 互いに相手の構成要素を作り合い, かつ利用し合う。

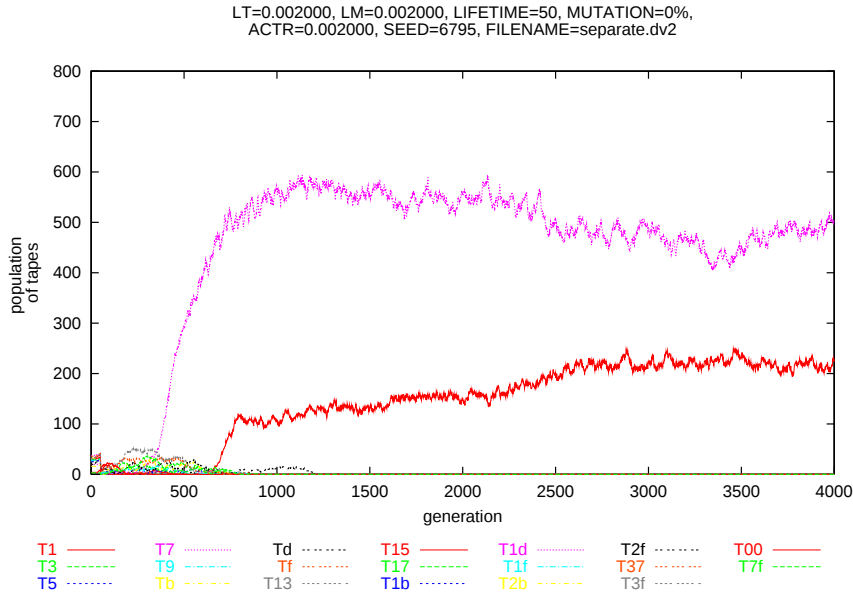


図 3.18: 例 3 における各テープの時系列

空間構造の影響がある場合

局所的な反応が起きている場合には，空間的にも分離した異なる種類のネットワークが並存する場合がある。

具体的なパラメータは平均自由行程を 0.002，テープ，マシンの寿命を 50 ステップ，マシンの反応可能半径を 0.02 とした。これは空間構造の影響する場合の，テープとマシンの反応の性質を調べるためである。

例 3 単独で維持でき他とは無関係なネットワーク A，B

ネットワーク A，B はそれぞれ (T_1, M_{1002}) , (T_{1d}, M_{3aa7}) の組み合わせで自己複製しており，マシン，テープのどちらを介した相互作用も無い関係である。この際の各テープの時系列を図 3.18 に示す。また，互いの作るマシンとテープ同士は反応できないため，それぞれ別の場所を占拠することになる。図 3.19 は 3600 ステップにおける空間各所での各テープの分布を示す。

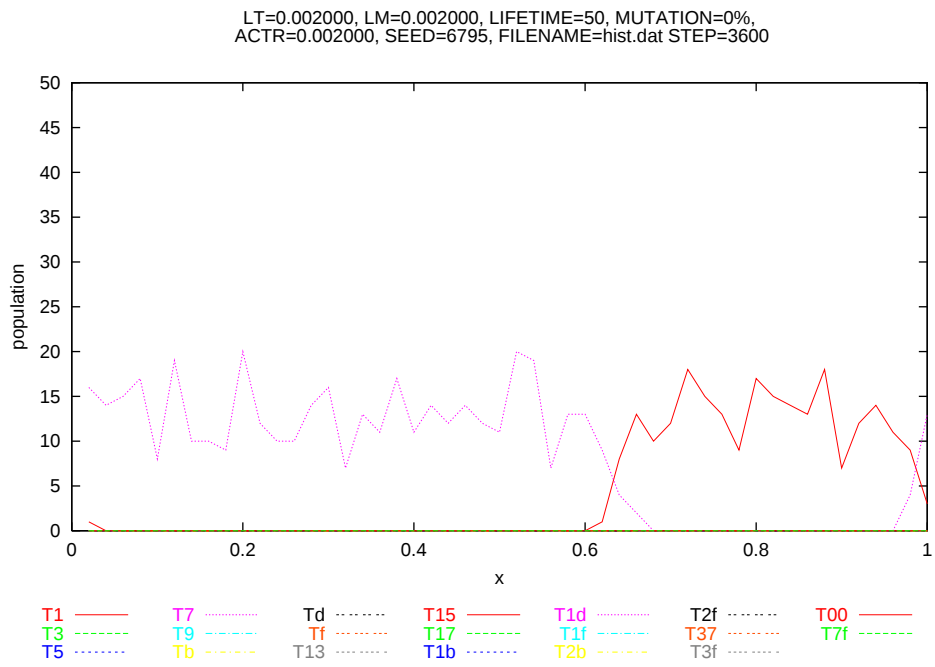


図 3.19: 例 3 における各位置での各タイプのヒストグラム (ステップ = 3600)

縦軸は各タイプのポピュレーション, 横軸は 1 次元空間における座標を表す。横軸はそれぞれ 50 区間に区切られている。ここではそれぞれの反応の領域がはっきり分かれている。

例 4 単独で維持でき寄生的かつ利他的なネットワーク A , B

自己維持し，かつ互いに作り合う関係にある複数のネットワークが空間的にそれぞれ異なる場所で存在する場合がある。このときの各テープの時系列を図 3.20 に，ネットワークを図 3.21 に，各位置での各テープのヒストグラムを図 3.22 に示す。 (T_{2f}, M_{3ee7}) , (T_{3f}, M_{bff7}) はそれぞれ自己複製可能な組み合わせであるが，お互いのテープでも反応することができ，相手のマシンと，相手の自己複製のためのテープを作りあう。ネットワーク A , B は自分の作ったテープを相手に読ませることで自分を作り出すという点では寄生的であり，また逆に相手のテープから，相手のテープ，マシンを作り出すという点で，利他的である。

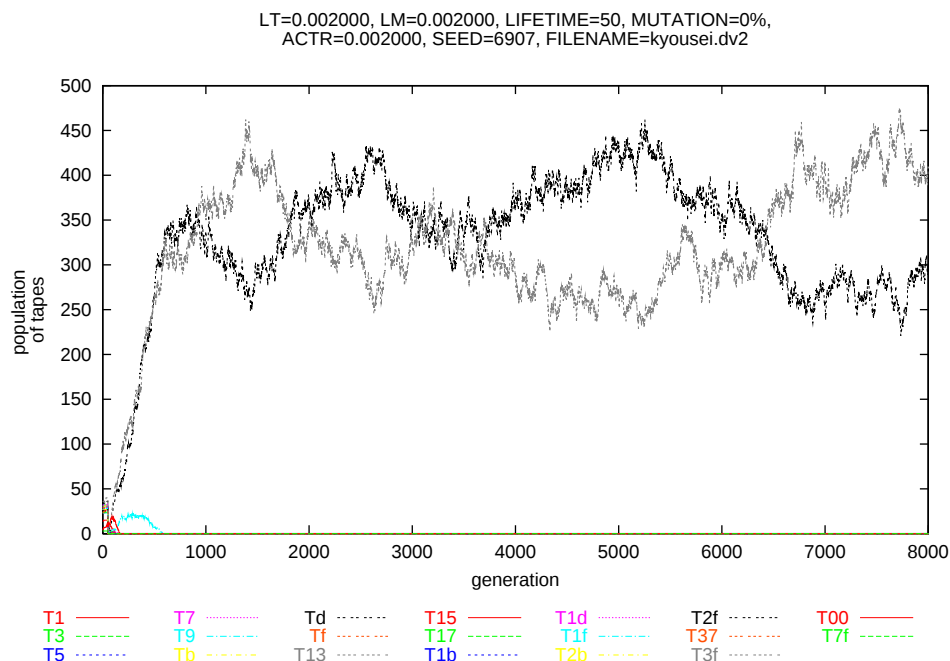


図 3.20: 例 4 における各テープの時系列

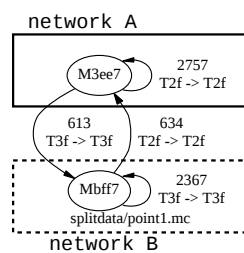


図 3.21: 例 4 におけるネットワーク (ステップ = 3500 ~ 4000)

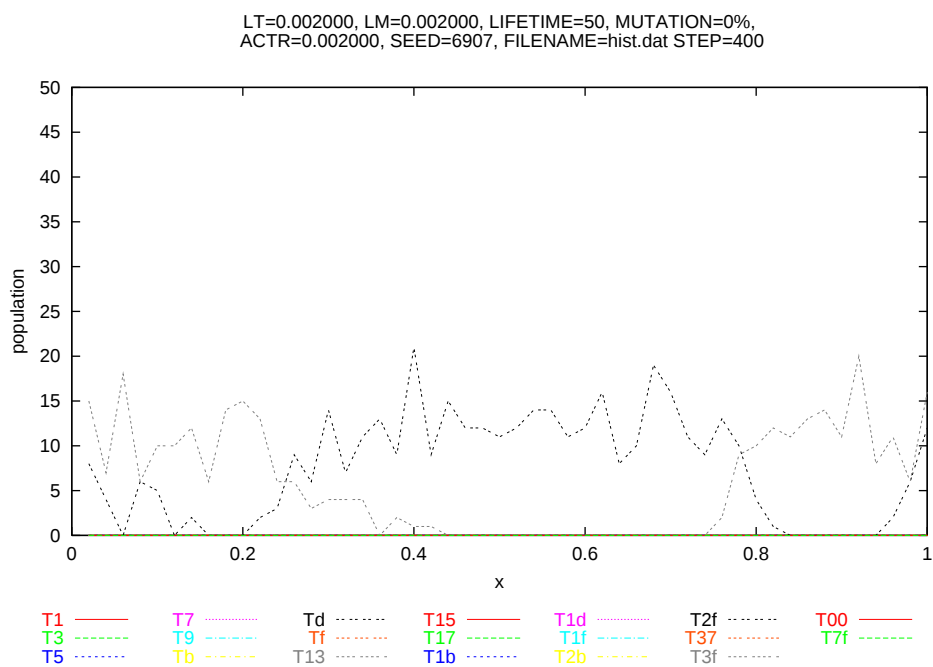


図 3.22: 例 4 における各位置での各タイプのヒストグラム (ステップ = 400)

例 5 単独で維持でき寄生的かつ利他的なネットワーク A と、単独で維持できず寄生的かつ利他的なネットワーク B

自己維持可能なネットワークと、それに寄生し、かつそのネットワークの要素を作っている 2 つのネットワークが空間的に異なる場合がある。このときの各テープの時系列を図 3.23 に、各位置での各テープのヒストグラムを図 3.26 に示す。また、ヒストグラムの図 3.26 における、空間座標が 0.2 ~ 0.4 までの領域で 3500 ~ 4000 ステップの間に起きた反応のネットワークを図 3.24 に、空間座標が 0.4 ~ 0.6 までの領域で 3500 ~ 4000 ステップの間に起きた反応のネットワークを図 3.25 に示す。図 3.24 太枠内のネットワーク A を構成する、 (T_{2f}, M_{3ee7}) は自己複製可能である。しかし、別のテープ T_{3f} があると、それと反応して別のマシン M_{f77e} を作る。このマシンはさらにテープ T_{2f}, T_{3f} と反応することで、別のマシンを作り出し閉ループをなす。このような意味において、ネットワーク A は利他的である。またこの反応は、最終的にはわずかにもとの (T_{2f}, M_{3ee7}) を生成する。そのような意味で、ネットワーク A は寄生的側面を持つといえる。またネットワーク B は、自らの利用するテープ、マシンを作ることにはできるが、ほとんどの反応が、いずれのテープ、マシンとも反応することのできないテープ、マシンを作ってしまうため、ネットワーク A が存在しないところでは存在できない。

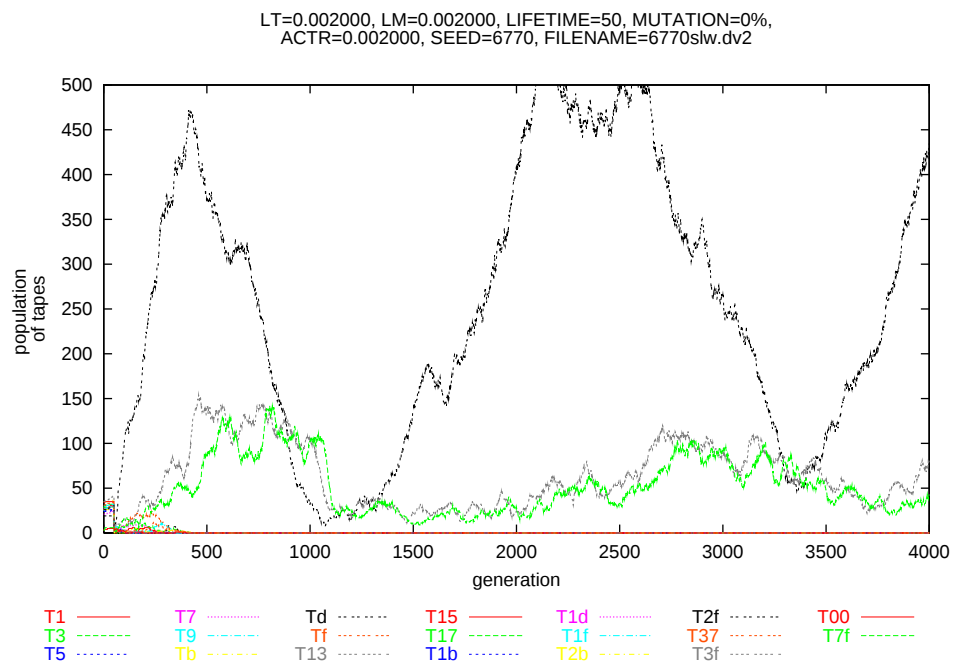


図 3.23: 例 5 における各テープの時系列

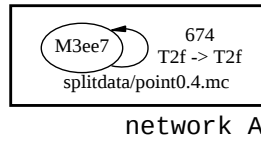


図 3.24: 例 5 におけるネットワーク (ステップ = 3500 ~ 4000) ネットワーク B がない場合

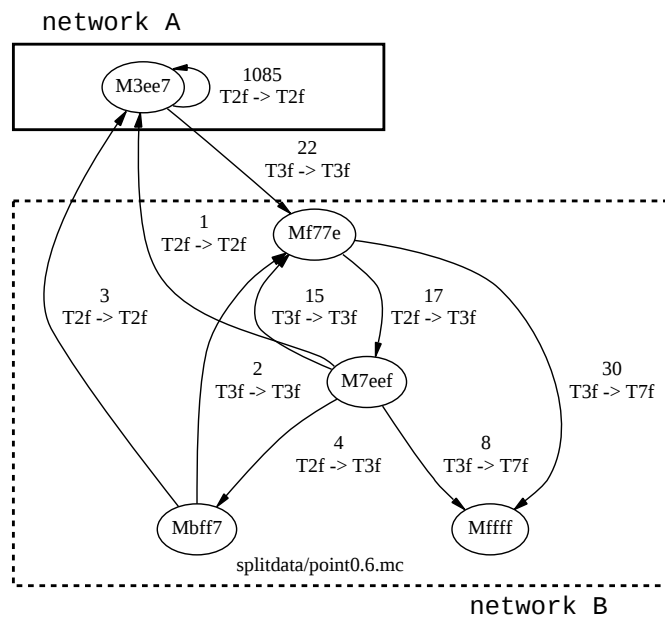


図 3.25: 例 5 におけるネットワーク (ステップ = 3500 ~ 4000) ネットワーク B がある場合

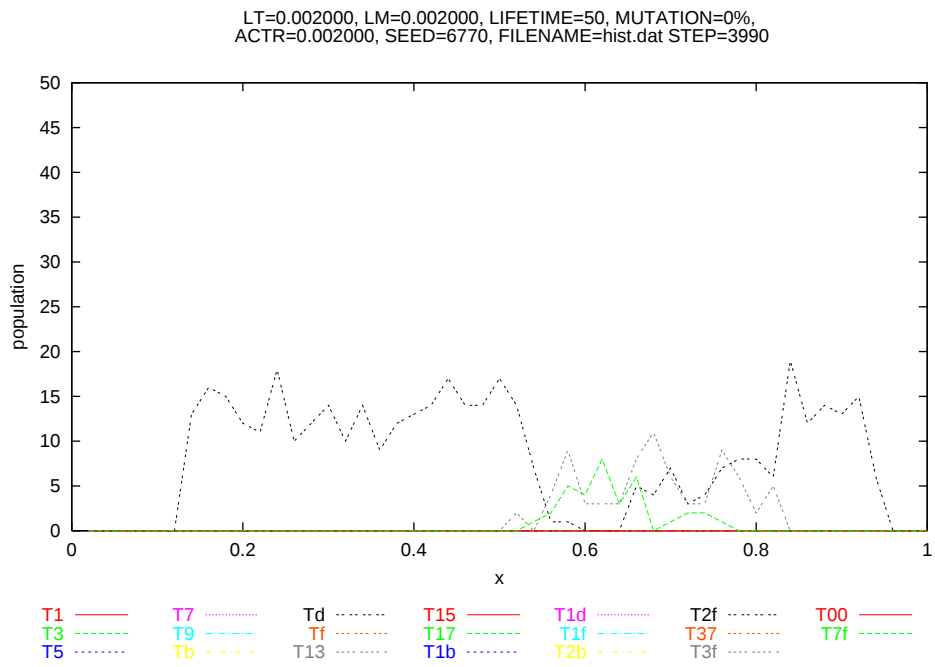


図 3.26: 例 5 における各タイプのヒストグラム (ステップ = 3990)

ネットワーク B の活動によって生ずる T_{3f}, T_{7f} はネットワーク A の作り出した T_{2f} の存在する場所に隣接した場所にしか存在しない。

例 6 単独で維持でき利他的なネットワーク A と，単独で維持でき寄生的なネットワーク B

自己維持可能なネットワークが，別の自己維持可能なネットワークに寄生している場合，がある。このときの各テープの時系列を図 3.27 に，反応のネットワークを図 3.28 に，各位置での各テープのヒストグラムを図 3.29 に示す。図 3.28 太枠内のネットワーク A を構成する (T_{2f}, M_{3ee7}) は自己複製可能である。しかし，別のテープ T_{17} があると，それと反応して図 3.28 点線内のネットワーク B を構成する (T_{17}, M_{9772}) を生成する。この組み合わせは確率的自己複製であるが，図 3.28 に示される以外のマシン，テープを作らない。ネットワーク A，B は共に単独で維持できるが，両者がいる場合ネットワーク A が一方的に搾取され絶滅し，ネットワーク B のみが残る。

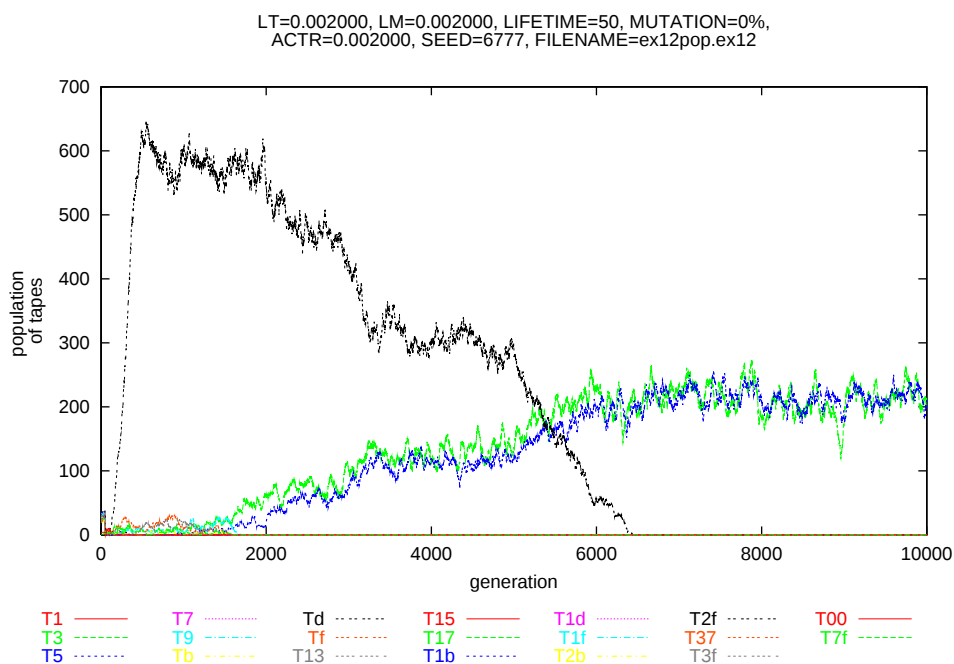


図 3.27: 例 6 における各テープの時系列

ネットワーク A によって作られるテープ T_{2f} は，ネットワーク A がネットワーク B に搾取されることで，次第に活動を抑制され，ついには絶滅することが，グラフからわかる。

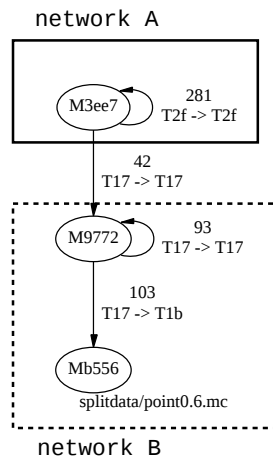


図 3.28: 例 6 における主なネットワーク (ステップ = 3500 ~ 4000)

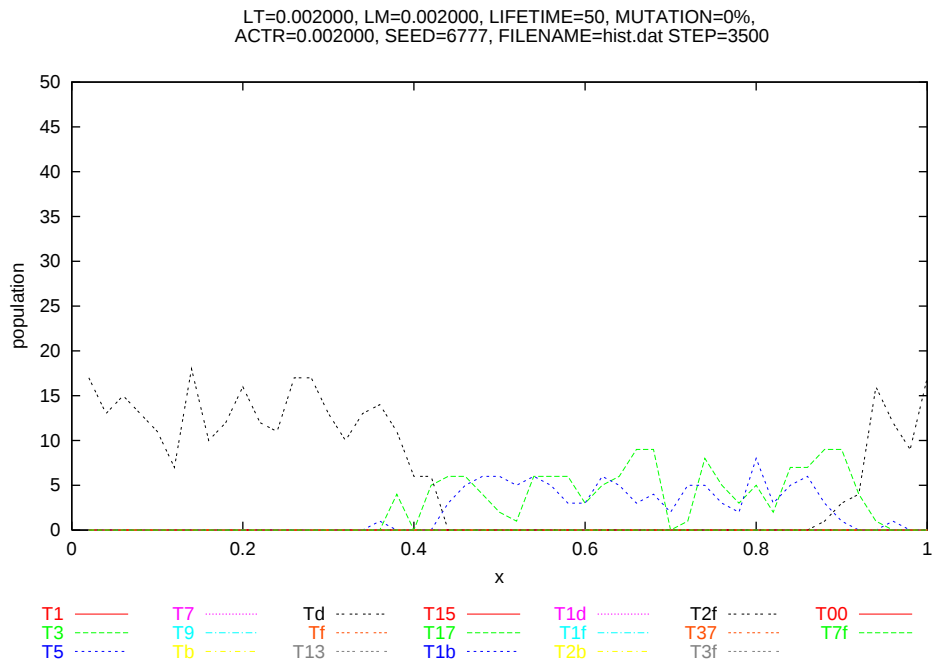


図 3.29: 例 6 における各タイプのヒストグラム (ステップ = 3500)

ネットワーク B の活動によって生ずる T_{17} , T_{1b} はネットワーク A の作り出した T_{2f} の存在する場所に次第に侵食していく。

第 4 章

議論

本研究における，空間構造を導入したテープとマシンのモデルを用いた実験では，様々なネットワーク，およびネットワーク間の関係を見ることができた。

4.1 要素の作る構造

全てのモデルにおいて，テープ，マシンという要素が作る構造として，自己複製，確率的自己複製，寄生的関係，コアネットワークの 4 種がみられた。

特にコアネットワークは，ランダムな初期条件から徐々に発展し，恒常的なネットワークを形作る。これらは，単独では生成できないものが，お互いを作りあうという構造になっており，部分的には存在できない。このような意味において，コアネットワークは，選択の新たな単位となっており，新たな階層の要素が自生的に作られたと考えられる。ここでは，最も基本的な要素であるテープ，マシンを 0 次の要素とし，コアネットワークを 1 次の構造と呼ぶことにする。

4.2 高次の構造

主にテープの翻訳をソースから行うモデルにおいて多種のネットワーク間の相互作用が観測された。すなわち，1 次の構造であるコアネットワークを要素（すなわち '1 次の要素'）とした，2 次の構造 'が自己組織化している。このときには，コアネットワーク単独ではみられなかった，コアネットワーク自体の他のネットワークに対する性質という新しい属性が見られる。

すなわち，ネットワークは単独では見られなかった，高次の関係を作っていることが確

認された。このような構造の出現により，ごく単純な自生的階層システムの発展が示されたといえる。

またこのネットワークは，1章2節で紹介したサイモン [1] のいう準分解可能性を持つシステムが持つ2つの条件を満たしている。1つは，テープやマシン単体の反応を見れば，それぞれの間には関連性がないということである。もう1つは，ある時間と，空間のスケールで見たときにはそれぞれのテープ，マシンはネットワークのような大域的秩序にしたがっているとみなせることである。このような理由からも，反応のネットワークを階層の要素としてみなすことは妥当であると思われる。

4.3 ネットワーク間相互作用と階層構造

2つのネットワーク間の関係を一般的に考えると，それは個々のネットワークにおける2種類の特徴であらわすことができる。その特徴とは，1つは単独で活動できるか否かである。もう1つは，他のネットワークに対する関係性である。その関係性は，無関係，寄生的，利他的，寄生的かつ利他的の4種類が考えられる。ここで寄生的というのは，相手の必要なテープ，マシンを使って自らのネットワークの活動を行うものである。また利他的というのは，相手の活動に自らのテープ，マシンを提供するものである。

従って，ネットワークAとネットワークBがあるとき，AがBに対して寄生的であれば，BはAに対して必然的に利他的であり，また逆も同様である。同様に，AがBに対して寄生的かつ利他的であれば，BもAに対して寄生的かつ利他的である。よって，2つのネットワーク間の関係では，片方だけのネットワークが無関係である場合，お互いに利他的である場合，お互いに寄生的である場合，片方だけのネットワークが寄生的かつ利他的である場合は存在しない。このことから必然的に，2つのネットワーク間の関係は，互いに無関係な場合，片方が寄生的で，もう一方が利他的な場合，お互いが寄生的かつ利他的な場合の3種類しか存在しない。

実際に3章3節のシミュレーションにおいて確認できたネットワーク間の関係は以下に示すものである。

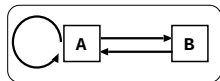


図 4.1: 例 1 において観察されたネットワーク間の関係

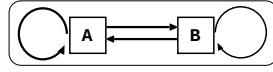


図 4.2: 例 2,4 において観察されたネットワーク間の関係



図 4.3: 例 1 において観察されたネットワーク間の関係

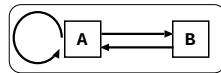


図 4.4: 例 5 において観察されたネットワーク間の関係

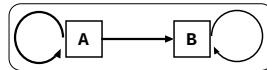


図 4.5: 例 6 において観察されたネットワーク間の関係

図 4.1 ~ 5 の A , B はそれぞれネットワークを表し , 矢印はその構成要素を作るほうから作られるほうに伸びている。図 4.1, 4.2, 4.4 は互いに寄生的かつ利他的 , 図 4.3 は互いに無関係 , 図 4.5 は片方が寄生的で , もう一方が利他的な場合である。よって , 2 つのネットワーク間の関係における , 互いに無関係な場合 , 片方が寄生的で , もう一方が利他的な場合 , お互いが寄生的かつ利他的場合の全て確認することができた。

一般には , 前述の 3 つの関係のうち , お互いが自己維持可能であるかどうかによって , 互いが存続できるか否かが決まるといえる。まず , 互いに無関係な場合には , お互いが自己複製可能でないと同じ状態は続かない。また , その他の場合は , 作り合う数のバランスにもよるが , 利他的な方が自己維持可能であれば , 互いは存続できる。互いが自己複製不可能でありながら , 互いに作り合うことで存続する関係はここでは見られなかった。

4.4 高次の構造が出現する条件

高次の構造を見ることができたのは、主にテープのソースから翻訳を始めるというモデル Sg,Sl の場合においてであった。モデル Sg,Sl の、テープの翻訳をヘッドの部分から始めるモデル Hg,HI との違いは、ネットワークの種類が多様であり、かつその関係性についても多様であるという点である。この差異の原因について考察する。

テープの翻訳の仕方は、モデル Hg,HI では、翻訳を開始する位置をヘッドからとし、モデル Sg,Sl ではソースからとした。マシンのヘッドとマッチする位置はテープによって異なるが、その位置は多くとも3種類までである。よって、モデル Hg,HI の場合は同じマシンによるテープの翻訳のされ方が3種類しかないということである。一方モデル Sg,Sl の場合は、テープのソースから翻訳が開始されるため、翻訳を開始する位置が最高で7種類ある。よって、最高でソースの数である7つの翻訳のされ方がある。そのため、モデル Sg,Sl はモデル Hg,HI に比べて反応の多様性が高い。モデル Sg,Sl においてネットワークの種類が多様であるのは、上記のメカニズムが原因であると考えられる。

また特にモデル Sl において空間構造の影響がある場合のモデルについては、モデル Sg,Sl において空間構造の影響がない場合のモデルでは実現し得ない関係が見られた。それは例えば例3の場合である。

例3は無関係な2つの自己複製ネットワークがある場合である。もし空間構造の影響がない場合にはこの2つのネットワークを構成するマシン、テープは互いに混ざり合い、お互い相手が反応できるテープ、マシンに出会う確率を下げてしまう。このため、最終的にはどちらか一方が生き残るか、お互いが絶滅すると考えられる。また、例6のようなネットワークは、空間構造の影響が無ければ、自己複製可能で最も効率的に増加するマシン (M_{3ee7}) 以外のマシンとは反応できないテープ (T_{2f}) が速やかに空間に拡散し、2つのネットワークの共存状態を壊し、一方のネットワークだけに支配されてしまうだろう。

これらの実験及び考察の結果、ネットワーク間の関係の複雑性はモデル Sl において最も高いと考えられる。

従ってモデル Sl の特徴より、反応のネットワークは反応の多様性が高く、特に局所的に異なる反応が可能なとき、多様なネットワーク間の関係を見せると考えられる。

4.5 一般の相互作用ネットワーク

実験結果から、お互いの維持のために作り合わねばならないような要素の集合において、多様な自生的階層システムの発展のためには、反応の局所性、及び多様性が重要であ

ることが示唆された。

本研究のモデルは化学反応を想定したものである。しかしここで得られた結果は、他の、要素が相互作用によって他の要素を作り、その要素がさらに相互作用に参加するような性質を持つ系にもあてはまるのではないだろうか。

この際には、反応の局所性、及び多様性の意味を読み替えなくてはならない。つまり、相互作用の局所性は物理的空間の局所性を意味するのではなく、相互作用の緊密さをメジャーとする空間における局所性を意味する。すなわち、相互作用する相手が、全ての要素に及んでいるのではなく、ある程度限定されている、ということである。さらに、相互作用の多様性とは、ある要素の組の間で、相互作用のかたちが多様であり、結果としてその相互作用によって生成されるものが多様であるということを意味する。

そのような系として考えられるものとしては、例えば、生態系一般や、分業による製品の生産などがある。結果の一般性について論ずるためには、相互作用の局所性、及び多様性という観点からこれらの現象を眺めたとき、本研究から得られた結果とそれらの間にどれほど関連があるのかを調べていくことが必要であると考えられる。

第 5 章

結論

本研究では、自生的階層システムの発展の条件および過程を、多様な触媒反応を担う化学物質が反応のネットワークを形作る現象のモデルを一例に用いて考察した。

ここでは、池上・橋本によって提案された記述テープとそれを解釈するマシンのモデルを用いた。これは本来化学種のポピュレーションダイナミクスを用いたものであるが、本論では反応の個別性を保持し、系全体での反応の多様性を実現するため、反応は個々の化学物質ごとに起きるようにした。

その結果として、全てのモデルで複数のテープとマシンの間に、自己複製、確率的自己複製、寄生的関係、相互に作り合うコアネットワークの4種の性質を確認した。

要素同士の反応の多様性が高い場合には、複数のネットワークが同じに存在することがある。特に空間的に異なる反応が可能なきときには多様なネットワーク間相互作用のタイプが見られた。

このような系は、要素の相互作用がネットワークというまとまりをなし、そのネットワークが相互作用する高次ネットワークを作っている構造になっている。よって、このような構造の出現により、ごく単純なものではあるが、自生的階層システムの発展が示されたといえる。

より一般的には、要素が相互作用により生成、維持されるような系において、多様な自生的階層システムの発展のためには、反応の局所性、及び多様性が重要であることが示唆された。

謝辞

本研究を進めるにあたって，指導教官の橋本敬助教授には，研究に関する様々なご教示，ご指導を賜りました。自由な研究環境をはじめとし，日頃の研究生生活全般への配慮に深く感謝いたします。

また，複雑系解析論講座の皆様からは，様々な分野のお話を伺う機会があり，非常に刺激を受けると共に，自らの問題意識を見つめ直す機会を持つことができました。この場を借りて深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Simon, H. A. The Science of Artificial Second Edition (1987) (「新版 システムの科学」稲葉元吉・吉原英樹訳 パーソナルメディア株式会社)
- [2] Polanyi, M. The tacit dimension Routledge & Kegan Paul Ltd., London, 1966 (「暗黙知の次元」佐藤敬三訳 紀伊国屋書店 (1980))
- [3] Schuster, P. How does Complexity Arise in Evolution?: Nature's recipes for mastering scarcity, abundance, and unpredictability. Santa fe institute working paper, 1996
- [4] Maynard Smith, J., Szathmary, E. The Major Transitions in Evolution W. H. Freeman/ Spektrum Akademischer Verlag, 1995 (「進化する階層」長野敬訳 シュプリンガー・フェアラーク東京, (1997))
- [5] Baas, N. Emergence, Hierarchies, and hyperstructure. *Artificial Life* **III**, 515-537, 1992
- [6] Mayer, B., Rasmussen, S. Lattice Molecular Automata(LMA):A phisico-chemical simulation system for constructive molecular dynamics. LANL and SFI preprint, 1996
- [7] Eigen, M., Schuster, P. The hypercycle. A principle of natural self-organization Part A: emergence of the hypercycle. *Naturwissenschaften* **64**, 541-565 1971
- [8] Ikegami, T., Hashimoto, T. Active mutation in self-reproducing networks of machines and tapes. *Artificial Life* **2**, 305-318, 1995
- [9] Ikegami, T., Hashimoto, T. Replication and diversity in machine-tape coevolutionary system. *Artificial Life* **V**, 1996
- [10] Fontana, W. Algorithmic chemistry, *Artificial Life* **II**, 159-207, 1991